

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Diplomová práce

2014

Bc. Zdeněk Máca

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Využití energie slunečního záření k výrobě
vodíku**

**Utilisation of solar energy to hydrogen
production**

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Zdeněk Máca

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Využití energie slunečního záření k výrobě vodíku
Utilisation of solar energy to hydrogen production

Zásady pro vypracování:

1. Vlastnosti vodíku jakožto energetického nosiče
2. Perspektivy vývoje vodíkového hospodářství v celosvětovém měřítku
3. Možnosti výroby vodíku ve vztahu k solární energetice
4. Návrh systému pro akumulaci solární energie do vodíku
5. Technicko - ekonomická analýza vodíkového akumulčního systému

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Tuček, V., Dvořáková, L., Hanzal, J.: Vodík, Česká asociace technických plynů, Praha, 2004.
2. Minařík, D.: Implementace palivového článku do fotovoltaického systému, Disertační práce, Ostrava, 2011.
3. Doucek, A., Tenkrát, D., Dlouhý, P.: Vodíkové hospodářství a možnosti využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie, časopis Paliva, 2010.
4. Františák, M.: Vodíkové technologie v laboratorním provozu, Bakalářská práce, Ostrava, 2013.
5. Prospects for hydrogen and fuel cells, OECD/IEA, 2005.
6. Výroba vodíku, online: <<http://www.hybrid.cz>>
7. Vodíkové technologie, online: <<http://www.hytep.cz/>>

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Moldřík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

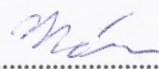


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Datum: 7.5.2014

Podpis:

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce panu Ing. Petru Moldříkovi, Ph.D. za cenné rady a vedení při tvorbě této práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vodíkovou technologií a teoretickým návrhem vodíkového akumulčního systému. V první kapitole je popsán vodík jakožto chemický prvek. Dále pak je vysvětleno jeho nové využití jako energetického nosiče a jeho použití ve světě. Druhá kapitola je zaměřena na vodíkové hospodářství. Tato kapitola obsahuje výhody a nevýhody vodíkového hospodářství. Dále pak souhrn vodíkových projektů a jejich umístění ve světě. Další kapitola je o možnostech výroby vodíku ze fotovoltaických elektráren. V této kapitole jsou popsány fyzikální principy vodíkových technologií, které se ve světě používají. Rovněž je provedeno jejich srovnání. Na konci této kapitoly jsou popsány možnosti spojení této technologie s fotovoltaickou elektrárnou a jejich výhody a nevýhody. V předposlední kapitole je proveden teoretický návrh vodíkového akumulčního systému. V práci je rozebrána logika systému, jeho blokové schéma a seznam komponentů k jeho provedení. V neposlední řadě je proveden výpočet účinnosti a životnosti celého systému. V konečném posledním bodě práce je technicko-ekonomická analýza. Zde jsou řešeny investiční a provozní náklady systému a rovněž teoretický návrh na způsob dotace podobných systémů.

Klíčová slova

Sluneční elektrárna, Vodík, vodíkový systém, Palivový článek, PEM články, Elektrolyzér, Akumulační systém, Obnovitelné zdroje.

Abstract

The thesis deals with hydrogen technology and theoretical proposal of a hydrogen storage system. The first chapter describes the hydrogen as a chemical element. Further it is explained its new use as an energy carrier and its use in the world. The second chapter focuses on the hydrogen economy. This chapter contains the pros and cons of a hydrogen economy. In addition, a summary of hydrogen projects and their location in the world. The next chapter is about the possibilities of producing hydrogen from solar power. This chapter-described physical principles hydrogen technologies are used worldwide. It is also compared them. At the end of this chapter are described the possibilities of linking this technology to solar power plant and their advantages and disadvantages. The penultimate chapter is a theoretical proposal of a hydrogen storage system. The thesis discusses the logic of the system, the block diagram, a list of components for its implementation. Last but not least has been calculated efficiency and lifetime of the system. In the end, the last point of the work is technical-economic analysis. Here are dealt investment and operating costs of the system and also a theoretical proposal to grant similar way systems.

Key Words

Photovoltaic, Hydrogen, Hydrogen system, Fuel cells, PEM Fuel cells, Electrolyzer, Accumulation system, Renewable energy source.

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka:	Název:	Jednotka:
AC	Střídavý proud (Alternating Current)	
ČR	Česká republika	
CEC	Clean Energy center	
DC	Stejnoseměrný proud (Direct Current)	
FVE	Fotovoltaická elektrárna	
I	Elektrický proud	A
I_{MP}	Proud při maximálním výkonu	A
I_{SC}	Proud na krátko	A
MPP	Bod maximálního výkonu(Maximum Power Point)	
MEA	Membrane Electrode Assembly (uspořádání membrány s elektrodami)	
Nm³	Normativní (jmenovitý) kubický metr	
PLC	Programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)	
PČ	Palivové články	
PEM	Proton Exchange Membrane nebo Polymer Electrolyte Membrane	
Q_t	Velikost elektrického náboje potřebného pro výrobu 1 molu vodíku	Ah
SPE	Solid Polymer Electrolyte (Elektrolyt s pevným polymerem)	
SOFC	Solid Oxide Fuel Cells (Palivový článek na bázi pevných oxidů)	
SOEC	Solid Oxide Electrolysis Cells (Elektrolyzér na bázi pevných oxidů)	
U	Elektrické napětí	V
V_{MP}	Napětí při maximálním výkonu	V
V_{OC}	Napětí na prázdko	V
U_{ROV}	Rovnovážné napětí chemické reakce	V

V_{molH_2}	Objem 1 molu vodíku	litr
V_{H_2}	Objem vodíku	litr
VŠB	Vysoká škola Báňská	
VE	Větrné elektrárny	
Wp	Watt Peak	

Obsah

Úvod	1
Vlastnosti vodíku jako energetického nosiče	2
Vodík jako prvek	2
Energetický nosič	3
Využití vodíku v praxi.....	4
Uskladnění vodíku.....	5
Perspektivy vývoje vodíkového hospodářství v celosvětovém měřítku	8
Vodíkové hospodářství.....	8
Vodíkové projekty	14
Projekt Myrte.....	14
Projekt INGRID	16
Vodíková větrná elektrárna	18
Možnosti výroby vodíku ve vztahu k solární energetice	20
Solární energetika a její problémy.....	20
Výroba vodíku.....	21
Druhy vodíkových systémů se solární elektrárnou.....	27
Návrh systému pro akumulaci solární energie do vodíku	30
Vodíkový akumulační systém	30
Blokové schéma systému	31
Komponenty systémů	32
Fotovoltaická elektrárna	32
Střídač.....	33
Elektrolyzéry	35
Úložiště vodíku (tlakové láhve).....	36
Palivový článek	37
Měniče Victron.....	38
Baterie	39
Další komponenty.....	39
Logiky systémů	40
Systém 1	40
Systém 2	42
Parametry systémů	44

Účinnost systémů	44
Provoz systému.....	46
Životnost systémů.....	47
Bezpečnost systémů	48
Technicko - ekonomická analýza vodíkového akumulčního systému.....	49
Investiční náklady:	49
Provozní náklady	50
Podpora vodíkového systému.....	50
Závěr.....	56
Literatura	57
Přílohy	59
Seznam příloh.....	59

Úvod

"Čím se tedy bude topit, nebude-li uhlí ?" - "Vodou, ovšem rozloženou na její prvky," odpověděl Cyrus Smith. "Budou ji rozkládat snad elektřinou, která se stane mocnou a hybnou silou. Věřím, že vody bude využíváno jako paliva. Voda je uhlím budoucnosti." Když Jules Verne psal svůj román Tajuplný ostrov a jedna z jeho postav pronesla tuto větu, určitě nevěděl, jak blízko bude pravdě. Fosilní paliva v posledních letech zdražují. Není to však tím, že by jich na světě nebyl dostatek, jen se obtížněji získávají. Fosilní paliva mají také tu nevýhodu, že nepříznivě ovlivňují životní prostředí. Díky těmto nevýhodám se lidstvo pokouší najít vhodnou náhradu. Jedním z takových náhrad fosilních paliv by mohl být právě vodík. Člověk zná dobré vlastnosti vodíku již dlouho a našel pro něj mnoho uplatnění. Až v poslední době se však na vodík začíná dívat jako na možnost paliva hlavně pro automobilový průmysl. Již dnes je ve světě spousta různých vozidel využívajících k jízdě vodíkové technologie.

Zajímavý pohled na využití vodíku nabídla také energetika. Ta se na vodík dívá jako na energetický nosič, ne-li na něco, do čeho by se dala s úspěchem akumulovat elektrická energie. Díky podpoře obnovitelných zdrojů a stále nedůvěře k jaderné energetice hlavně v Německu, prudce vrostl počet fotovoltaických a větrných elektráren. Bohužel však tyto elektrárny mají některé nevýhody a ty se promítají v jejich provozu. Na severu Německa jsou například jedním z hlavních zdrojů energie větrné elektrárny. Jejich provoz je však minimální, neboť spotřeba je menší než výroba, a proto bývají většinu času odpojené od sítě. Pokud by člověk našel vhodný akumulační systém, kterým by mohl být právě vodík, mohl by přebytečnou energii akumulovat. Takovýto způsob využití vodíku však vyžaduje výzkum. Ve světě již však existuje několik projektů zabývajících se vodíkem jako akumulačním zařízením.

Díky všem těmto pohledům se výzkum vodíkových technologií značně zvýšil a otázka vodíkového hospodářství již není hudbou budoucnosti.

Vlastnosti vodíku jako energetického nosiče

Vodík jako prvek

"Dvě věci na této zemi jsou všude přítomné: Vodík a lidská hloupost."



Obr. 1 - Atom vodíku

Vodík je z 98 % nejčastější prvek ve vesmíru. Vodík tvoří převážnou část hmoty ve vesmíru.

Vodík se v přírodě nikdy nevyskytuje izolovaně, ale pouze ve sloučeninách s jinými prvky. Nejčastější sloučeniny jsou ty s uhlíkem ve formě zemního plynu a s kyslíkem ve formě vody. Aby bylo možné vodík využít, je třeba jej izolovat. [3] Na Obr. 1 je zobrazen atom vodíku složený z jednoho protonu a elektronu.

Vodík je nejjednodušší ze všech prvků, je bez barvy, zápachu a chuti a je 14krát lehčí než vzduch. Při teplotě $-252,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ vodík zkapalní. V reakci s kyslíkem se spaluje za uvolnění energie pouze na vodu.[3] V tabulce 1 jsou základní chemické vlastnosti vodíku.

Tabulka 1 - Vodík

Mezinárodní symbol	H ₂
Molekulová hmotnost M	2,01594
Molární objem	22,43 Nm ³ /kmol
Normalizovaná hustota (0° C; 1,013 bar)	0,08987 kg/m ³
Kapalný vodík (LHY)	70,79 kg/m ³
Relativní hustota (air=1)	0,06950
Trojný bod	- 259,19° C
Bod varu	- 252,76° C

Zajímavé vlastnosti:

- Vodík je nejlehčí plyn a díky velikosti svých molekul bez obtíží proniká kovy jako železo, platina nebo paladium. Bez problémů uniká porézními dělicími stěnami, což z něj však i přes jeho nízkou hmotnost činí např. problematickým palivem do balonů.
- Vodík má schopnost podstatně vyšší vodivosti tepla než vzduch. Lehké molekuly vodíku se pohybují výrazně rychleji než těžké molekuly dusíku a kyslíku.
- Rozpustnost vodíku ve vodě je jen nepatrná, poněkud lepší v alkoholu. Mimořádně velkou schopnost rozpustit vodík mají naproti tomu mnohé kovy. Houbovitý kov paladium je schopen přijmout vodík až do 850 násobku svého vlastního objemu.
- Má vysokou hustotu energie. V tabulce 2 je porovnání hustoty energie vodíku s běžnými palivy

Tabulka 2 - Porovnání hustoty energie [16]

Zdroje energie	kWh/kg
Vodík	39,72
Benzín	13,11
Nafta	12,01
Propan vč. LPG	12,89
Tuk (živočišný/rostliný)	10,28
Uhlí	6,67
Karbohydráty vč. cukru	4,72
Protein	4,67
Dřevo	4,5
TNT	1,28
Střelný prach	0,83

Energetický nosič

Pro princip energetického nosiče je dobré si uvědomit několik faktů:

Energii jako takovou nelze vyrobit ani zničit! Energie se pouze přeměňuje z jedné formy na druhou, většinou pro nás důležitější, např. na elektřinu nebo teplo.

Každá přeměna a přenos energie je spojena se ztrátami! To znamená, že nikdy nejsme schopni transformovat energii celou.

Jako příklad je možno uvést tepelnou elektrárnu, ve které se uhlí (chemická energie) přeměňuje na teplo v kotli (tepelná energie). To je využito k vytvoření páry požitá k otáčení turbíny (mechanická energie) a ta nakonec otáčí generátorem, který vyrábí elektřinu (elektrická energie). Za zmínku také stojí, že dnešní tepelné elektrárny mají účinnost asi 33 %, to znamená, že ze 100 % energie chemické dodávané se jen 1/3 přemění na energii elektrickou.

Elektrická energie se stala pro člověka v dnešní době neocenitelnou součástí. O její důležitosti se lze přesvědčit, pokud si člověk na okamžik představí život bez ní. Kromě výhod, které elektřina poskytuje, má i některé nevýhody. Z energetického hlediska je hlavním problémem to, že energie nejde jen tak akumulovat. V elektrické síti se rovná výroba s poptávkou - to znamená, že elektrická energie vyrobená se musí rovnat elektřině spotřebované + ztrátám.

Momentálně existuje mnoho způsobů, jak elektrickou energii akumulovat, avšak žádný z nich není úplně ideální. Proto se hledají další způsoby, jak účinně elektřinu akumulovat. Jedním z těchto způsobů, o kterém se v posledních letech hodně hovoří, je akumulace energie do vodíku. Vodík se potom může použít pro zpětnou výrobu elektřiny pomocí palivových článků, nebo využít přímo.

Energetický nosič je tedy látka (forma energie), nebo energetický systém, který obsahuje energii, která může být později převedena do jiné formy energie, jako je mechanické práce, teplo nebo elektřina.

Vodík jako nosič

Vodík není klasické palivo, ale energetický vektor či-li nosič energie. V praxi to znamená, že jej nelze levně a energeticky efektivně těžit (už proto, že se vodík v elementární formě na zemi prakticky nevyskytuje) a využívat k produkci primární energie, ale naopak se musí pracně a s nemalými ztrátami energie vyrábět. Vodíkové technologie jsou tedy pouze maximálně tak ekologicky čisté, jak čisté jsou primární zdroje energie a suroviny, které jsou při výrobě vodíku využity. Z těchto aspektů plyne možné využití vodíkových technologií. [1]

Vodík se využívá při tepelném zpracování kovů, výrobě potravin, elektroniky, chemikálií a dále jako zdroj energie a v rozmanité škále dalších oborů. V současnosti se nejčastěji vyskytuje jako součást ochranných atmosfér, které využívají vlastností vodíku při zpracování nebo úpravě různých materiálu. [2]

Kolem 95 % v současnosti vyráběného vodíku je ihned využíváno ve spotřebitelském průmyslu. Celosvětově se vyráběné množství vodíku pohybuje ročně kolem 45 milionů tun. [3]

Značná část vyráběného vodíku (48 %) pochází v současné době z úpravy zemního plynu. Pouze 4 % vodíku se dnes získávají z čisté elektrolýzy, kdy je voda elektrickou energií rozložena na své elementární součásti, vodík a kyslík. [3]

Využití vodíku v praxi

Metalurgický průmysl

Vodík, který je součástí ochranných atmosfér, udržuje redukční prostředí, které zabraňuje oxidaci materiálu a v případě uhlíkových ocelí i jejich oduhlíčení při tepelném zpracování. V závěru cyklu tepelného zpracování se využívá dobré tepelné vodivosti vodíku ve srovnání s ostatními plyny, pro urychlení ochlazování vsázky pece. [2]

Sklářský průmysl

Při výrobě skla se vodík používá jako součást ochranné atmosféry cínové lázně pro plavení plochého skla a jako topné médium pro zpracování tvrdých skel plamenem. [2]

Elektrotechnický průmysl

V elektronickém průmyslu se využívá řada aplikací s vodíkem. Příkladem těchto aplikací je jejich používání jako ochranné atmosféry při redukci oxidu křemičitého při výrobě silikonových destiček pro integrované obvody, dále použití vodíku jako reagující složky a nosného plynu při výrobě bipolárních integrovaných obvodů. [2]

Energetika

V elektrárnách se vodík využívá především pro chlazení alternátorů turbin, kde se využívá výborné tepelné vodivosti vodíku při chlazení elektrických strojních zařízení. [2]

Chemie

Vodík se používá hlavně při syntéze čpavku, aminů a chlorovodíku. Dále se využívá při výrobě dalších organických sloučenin jako např. metanolu a v procesu výroby syntetického benzínu z uhlí. [2]

Ostatní

Kosmický program využívá kapalného vodíku jako paliva k pohonu raket, raketoplánů a je také průkopníkem použití vodíku pro výrobu elektrické energie a vody za pomoci palivových článků na palubách kosmických lodí. [2]

Uskladnění vodíku

Tlakové láhve

Pro skladování se nejčastěji používá ocelových bezešvých lahví z nízkouhlíkatých nebo legovaných chrom-molybdenových ocelí. V ČR jsou nejběžnější 50 l lahve. Největší výrobce tlakových lahví v ČR dokáže vyrobit lahev o objemu 150 l. Pro auta nebo autobusy se obvykle používá kompozitních tlakových nádob. Ty se vyrábějí ve velikostech od desítek litrů až přibližně do 300 l a jsou potaženy tenkou vrstvou kovu případně speciálního polymeru, který zabraňuje úniku plynu přes strukturu kompozitu.

Běžný provozní tlak je 200 nebo 350 bar. V nejnovějších aplikacích se tlak zvýšil na 450 až 700 bar. V laboratorních podmínkách byl odzkoušen tlak 1000 bar, což je současný technologický limit. Tlakový způsob skladování vodíku je bezpečný a lety provozu ověřený, ale technologický potenciál je však téměř vyčerpán.

Standardním způsobem zvyšování kapacity skladovacího prostoru je shromažďování a propojování nádrží do větších celků. [13]

Pro ukládání vodíku do tlakových láhví platí, čím vyšším tlakem jsou plněny, tím větší množství se do nich dá uskladnit. Je však potřeba pro plnění tímto způsobem kompresor, který tlak dokáže zvýšit na požadovanou hodnotu, která bývá 200 bar. Při takovém tlaku lze do tlakové láhve vehnat až 9 m³ vodíku a při snižování tlaku klesá přímo úměrně množství uskladněného vodíku. Tlakové láhve jsou vyrobeny z legované chrommolybdenové oceli, jejich hmotnost je 61 kg, vodní objem 50 litrů. Již zmiňovaná náplň 9 m³ odpovídá hmotnosti vodíku 0,75 kg. Nevýhodou takového skladování jsou přísné bezpečnostní podmínky, jak při plnění, tak i při přepravě tlakových lahví. [2]

Kapalný vodík

Kapalný vodík se využívá hlavně u spotřebitelů, kteří potřebují nepřetržitou dodávku vodíku. Díky velmi nízké kondenzační teplotě vodíku, která je -252,7 °C a souvisí s ní nízká účinnost zkapalňovacího zařízení, je proces zkapalnění vodíku podstatně dražší, než např. dusíku. Pro zkapalňování vodíku se využívá nejčastěji Claudova procesu, který lze popsát ve čtyřech krocích :

- stlačení vodíku a odvedení kompresního tepla
- předchlazení kapalným dusíkem
- expanze v expanzní turbíně a s tím spojené ochlazení
- expanze na Joule-Thomsonově ventilu – další ochlazení až ke zkapalnění

Autocisterna s kapalným vodíkem má přepravní kapacitu 5000 až 47 000 litrů, což odpovídá cca desetinásobku transportní kapacity klasických 200 barových bateriových vozů.

Kapalný vodík je z cisterny plněn čerpadlem do kryogenního zásobníku, jehož kapacity bývají na 5000 až 47 000 m³ vodíku. [2]

Metalhydridy

Jako další možnost, jak skladovat vodík, je jeho uskladnění do metal-hydridů, které je založeno na principu snadné absorpce plynu určitými materiály, za podmínek vysokého tlaku a mírných teplot. Taková látka následně uvolňuje vodík, je-li zahřívána na vyšší teplotu. V podstatě se dá říct, že tyto materiály nasávají vodík jako houba např. vodu. Výhodou metal-hydridových systémů na uskladnění vodíku je fakt, že se vodík stává součástí chemické struktury těchto kovů, k čemuž není vyžadován nijak extrémně vysoký tlak, ani kryogenní teploty. Vodík je také z metal-hydridů uvolňován při nízkém tlaku, což z nich dělá nejbezpečnější způsob skladování z uvedených způsobů. Metal-hydridy jsou hlavně tvořeny z kovových slitin hořčíku, niklu, železa a titanu a dle teplot se dělí s vysokoteplotní a nízkoteplotní desorpcí vodíku. [5]

Vysokoteplotní - jsou levnější než nízkoteplotní, schopné uchovat více vodíku, ale vyžadují více tepelné energie pro jeho uvolnění, takže potřebují externí zdroj tepelné energie. Hlavními typy jsou Mg₂Cu-H₃, Mg₂Ni-H₄ a Mg-H.

Nízkoteplotní – tepelnou energii jsou schopné získat z okolí. Nízká teplota desorpce však může být problémem, protože vodík se pak uvolňuje příliš snadno, proto musí být pod tlakem, čímž vzrůstá komplikovanost procesu. Typy jsou $\text{Ti}_2\text{Ni-H}_{2,5}$, FeTi-H_2 , VH-VH_2 , $\text{LaNi}_5\text{-H}_{6,7}$. [5]

Hlavní nevýhodou metal-hydridů však není nutnost dodání tepelné energie nebo potřebný tlak pro extrakci vodíku, ale jejich nízká hustota energie. I ty nejlepší metal-hydridy obsahují totiž jen 8 % hmotnostního vodíku, což způsobuje jejich velkou hmotnost a nákladnost. Takový systém pak může být i 30-krát těžší a 10-krát objemnější než např. nádrž s benzínem o stejném energetickém obsahu. Další nevýhodou je nutnost používat jen velmi čistý vodík, jinak dochází ke kontaminaci s následnou ztrátou kapacity. Takové snížení kapacity však lze do určité míry reaktivovat teplem. Struktura metal-hydridů je také jejich problémem, vyrábí se totiž ve formě zrnité, granulované nebo práškové struktury, a to tak, aby poskytovaly co největší plochu pro kontakt s plynem. Tyto částice jsou však náchylné k mechanickému obrušování třením, což vede k redukci jejich efektivity a může také vést k ucpání propouštěcích orgánů nebo trubek. [5]

Perspektivy vývoje vodíkového hospodářství v celosvětovém měřítku

Vodíkové hospodářství

Vodík od svého objevení ušel velmi dlouhou cestu, avšak ještě mnohem delší ho ještě čeká. Vodíkové technologie, podobně jako ostatní, mají mnoho výhod i nevýhod. Pokud se někdy vodíkové technologie dočkají využití především v oblasti energetiky a dopravy, bude to tehdy, až jejich výzkum pokročí na dostatečnou úroveň, a hlavně, bude vyřešena samotná infrastruktura vodíkového hospodářství.

Co se týče dopravy, tak v tomto směru je hlavním problémem fakt, že velké dopravní společnosti a defakto celá dnešní infrastruktura je závislá na ropě. Ropa je hybnou silou lidstva už velmi dlouhou dobu, během které byly vynaloženy velké peníze na výzkum, který tuto technologii vylepšil a umožnil její komercializaci. Žádná jiná technologie umožňující nový způsob dopravy nemůže zcela nahradit dnešní ropné hospodářství. Technologie v tomto smyslu pokročila tak moc a stala se tak samozřejmou součástí dnešního člověka, že se bez ní nelze obejít. Pokud by člověk chtěl toto hospodářství něčím nahradit, musel by být přechod postupný a musel by existovat plán, jak takovýto přechod provést. Takovéto plány vyžadují kromě peněz i moře času na přípravu. Musely by se vytvořit složité modely, jak takovéto hospodářství provozovat a jak je komercializovat.

V oblasti energetiky je však pro vodík mnohem slibnější cesta. Poptávka po obnovitelných zdrojích a zelené energii je v poslední době veliká. V posledních letech hodně států vynaložilo spoustu peněz na výzkum obnovitelných zdrojů. Mezi hlavní patří bezesporu Německo. Vodík hraje v energetice významnou roli, jak už bylo řečeno, jako energetický vektor. Výzkum se snaží o to, aby se stal vodík dobrým akumulacním prvkem pro el. energii, třeba v případě jejího přebytku. V tomto směru výzkum vodíku pokračuje dobře a existuje na světě mnoho projektů a modelů, jak takovýto systém, nebo spíše vodíkové akumulacní hospodářství, provozovat. Vodík se také dá použít na obohacení bioplynu pro výrobu tepla a podobně. V oblasti energetiky je tedy pro vodík cesta méně trnitá než v oblasti dopravy. Je však možné, že než vodík dosáhne svého vrcholu, bude nahrazen nějakou novou lepší technologií.

Na výhodách logistického řetězce **výroba – uskladnění – přeprava** spočívá inovační perspektiva vodíkového hospodářství. Při tomto přístupu již není vodík považován za bezprostřední palivo (jako např. v raketách nebo při pohonu spalovacího motoru), ale mnohem obecněji za nový nosič energie, srovnatelný s univerzálním nosičem energie pokrývajícím velkou část současného zásobování energií, totiž s elektřinou. Elektřina vyrobená v elektrárnách protéká kabely široce rozvětvených rozvodných sítí k jednotlivým odběratelským místům a její jedinou nevýhodou je, že se musí bezprostředně po vyrobení spotřebovat. To znamená, že ji nelze uskladnit (s výjimkou rychle vyčerpateľných baterií spíše malého výkonu) a vyrobit tak do zásoby.[6]

Ale právě tak i vodík, který je vyrobený ve vzdálených výrobních provozech, je možné distribuovat potrubím nebo převážet v cisternách. Navíc je možnost vodík před transportem nebo po

transportu uskladnit. To je jeho významná přednost oproti elektřině. Tak je např. možné vodík pro vozidla v silniční dopravě uskladnit v servisních tankovacích stanicích a podobně, jako benzin nebo naftu, ho vydávat na čerpacích stojanech. Z nádrže vozidla může vodík jako nosič energie napájet palivový článěk, dodávající potřebný elektrický proud pro hnací motor, kterým je vozidlo vybaveno. Vodík tak obrazně řečeno „bezdrátovým způsobem“, zajišťuje dostupnost elektrického proudu. Skutečné technické řešení je ovšem složitější, protože je třeba brát v úvahu všechna technologická hlediska i bezpečnostní rizika spojená se skladováním, přepravou a manipulací s vodíkem.[6]

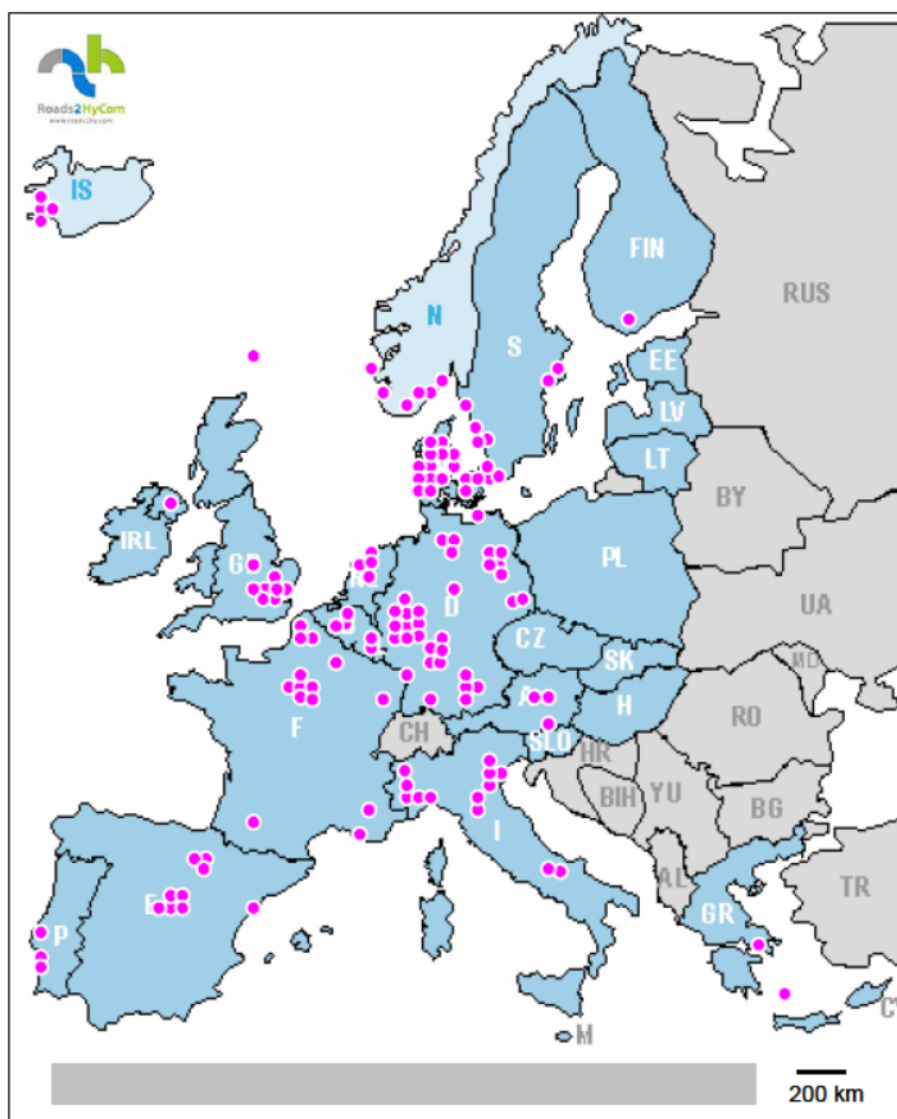
I ze zjednodušeného popisu tohoto logistického řetězce je zřejmé, proč je třeba mnohoslibné vyhlídky palivových článků v automobilovém průmyslu začlenit do velmi ambiciózní koncepce, postavené na radikálně novém vodíkovém hospodářství. Konstrukteři automobilů, kteří jsou touto technologickou změnou objektivně nadšeni, budou moci pokračovat v nastoupené cestě pouze tehdy, když se bude celý globální systém výroby, distribuce a spotřeby vodíku postupně vyvíjet. A to je nutné s vynaložením obrovských, koncentrovaných investic teprve vědecky promyslet, navrhnout a poté vyzkoušet a uskutečnit.[6]

Infrastruktura vodíkového hospodářství ovšem daleko překračuje oblast dopravy. S hlediska celkové energetické potřeby společnosti by se měl vodík se svými schopnostmi stát trvalým spojencem elektřiny. Výzkumy, které v současnosti probíhají, jsou již zaměřeny na prototypy velkých stacionárních palivových článků pro aplikace v energetice. Ty by mohly jako plně decentralizované jednotky uspokojovat obrovskou poptávku průmyslu, zemědělství, sektoru služeb i domácností po elektřině, ale také po teple (kogeneraci tepla a elektřiny) a mechanické energii. V těsné spolupráci se zainteresovanými průmyslovými podniky se využívání vodíku jeví v několika příštích desetiletích jako schůdné a udržitelné východisko ze slepé uličky, do které světový energetický systém přivedlo trvalé „upřednostňování fosilních paliv,.. Evropskou unii by navíc důsledná orientace na využití vodíku jako základního zdroje energie zbavila stále rostoucích starostí o zajištění své nezávislosti na dovážených nosičích energie. A i proto má vodíkové hospodářství v nejvyšších politických kruzích EU takovou podporu. [6]

Realizace vodíkového hospodářství vyžaduje četná řešení a úspěšné zvládnutí nejrůznějších úkolů:

- Musí se podařit nalézt ekonomické metody pro izolaci, odbyt a využití vodíku, neboť největší problém spočívá v tom, jak zpřístupnit vodík každému.
- Ještě není přesně známo, jak bude vybudována infrastruktura, ve které každý uživatel v budoucnu natankuje vodík tak samozřejmě, jako dnes benzin. Ještě nelze tušit, jaké konkrétní požadavky vyplynou na stávající průmyslovou infrastrukturu.
- Musí se podařit snížit náklady elektrolýzy na takovou hodnotu, že se bude vyplácet tuto formu výroby vodíku realizovat, jako je tomu například při využití zemního plynu.
- Ještě není známo, do jaké míry budou lidé v budoucnu akceptovat nové zdroje energie.
- Aby byl vodík veřejností přijat, je nezbytné zorganizovat široce pojatou osvětovou kampaň o této technologii. Tato osvěta musí být prováděna napříč celým spektrem obyvatelstva. Je tedy nutné, aby průmysl a jednotlivé vlády spolupracovaly ve všech těchto oblastech [9]

Na Obr. 2 z roku 2007 je vykreslena většina projektů v EU. Většina z nich je v blízkosti velkých a hlavních měst. To je dáno lepší finanční podporou.



Obr. 2 Geografické rozložení vodíkových projektů v EU [7]

Potěšující zprávou je, že celkový objem dodaných jednotek palivových článků všech typů stoupl ve srovnání s rokem 2011 o 86 %. Celkově bylo dodáno 45 700 jednotek palivových článků. Celkový dodaný výkon přesáhl hranici 150 MW o 16,7 MW. Tato čísla dokazují, že palivové články se stále více prosazují v různých oblastech průmyslu a energetiky, kde nabízejí lepší řešení než konvenční systémy s vnitřním spalováním nebo baterie.[10]

Nejvíce dodaných jednotek palivových článků (88 %) bylo založeno na technologii PEM palivových článků, avšak v oblasti instalovaného výkonu má PEM technologie vyrovnaného konkurenta v podobě palivových článků MC (molten carbonate - palivové články využívající jako elektrolyt taveninu uhličitánů). Ty jsou využívány zejména jako stacionární zdroje elektrické energie. [10]

Zajímavé je prudké zvýšení poptávky po přenosných palivových článcích (od 5 W do 20 kW). Prodáno bylo 18 900 takovýchto jednotek, což oproti roku 2011 znamená nárůst o 174 %. I přes vysoký růst prodeje se v této oblasti bohužel nepodařilo plně využít dostupný potenciál a to zejména z důvodu výpadku dobíjecích zařízení. Ze tří proklamovaných vodíkových nabíječek se dvě nepodařilo v daném termínu uvést na trh a v případě třetí byla poptávka mnohem nižší, než se očekávalo. Neustálý zájem o technologii přenosných palivových článků však projevují armády po celém světě. Takovéto jednotky totiž umožňují zabezpečit elektrickou energii pro kritické systémy, jako je navigace, či komunikace, při úspoře hmotnosti a delší pracovní době ve srovnání s bateriemi. Výkon všech přenosných zařízení dosáhl za rok 2012 asi 0,5 MW. [10]

Největším dílem k celkovému dodanému výkonu palivových článků přispívají stacionární jednotky. Za rok 2012 činila hodnota instalovaného výkonu 124,9 MW (75 % celkového výkonu instalovaného za rok 2012). V primárních aplikacích dodávajících elektrickou energii vévodí v současné době tři společnosti: FuelCell Energy (MCFC, 300 kW), Bloom Energy (SOFC, 200 kW) a ClearEdge Power (PAFC, 400 kW). Velký zájem o stacionární jednotky palivových článků projevuje zejména Jižní Korea, kde jsou tyto jednotky mimo jiné použity v budované Lotte World Tower (2x400 kW), Busan International Finance Center (400 kW, či slouží jako 3 MW elektrárna. Elektrárna využívající technologii palivových článků je od dubna 2013 budována také v USA u města Bridgeport, ve státě Connecticut. S plánovaným výkonem 14,9 MW se po jejím dokončení bude jednat o největší aplikaci tohoto typu v Severní Americe. Mezi stacionární jednotky se započítávají také mikro elektřina/teplo kombinované (mKET) jednotky. Prodej těchto systémů založených na vodíkových technologiích přesáhl v roce 2012 vůbec poprvé v historii prodej obdobných jednotek založených na klasickém spalování fosilních paliv. Tato situace je celkem jednoznačně dána vysokou poptávkou po vodíkových mKET jednotkách v Japonsku. Zde by do konce roku 2013 mělo být v rámci programu Ene-Farm instalováno kolem 50 000 mKET systémů. Systémy s výkonem 700 - 750 W elektrické energie se v Japonsku bez jakýchkoliv dotací prodávají za cenu okolo ¥2 miliony (380 tisíc Kč). Očekává se však snížení ceny díky dotacím. Vedle Japonska je této technologii věnována značná pozornost v Německu, kde bylo v rámci programu Callux instalováno 350 mKET systémů. V listopadu 2012 také začal evropský program s názvem Ene.field, v rámci kterého by mělo být ve 12 zúčastněných zemích rozmístěno na 1000 mKET jednotek různých typů. [10]

V oblasti dopravy, tedy zejména v oblasti zavádění vodíkových elektromobilů, k výraznému nástupu těchto technologií nedošlo. Všichni velcí automobiloví výrobci však mají rozpracovány koncepty vodíkových elektromobilů a předpokládají jejich uvedení na trh v rozmezí let 2015-2020. Nejblíže komerčnímu uvedení vodíkového elektromobilu na trh je v současné době automobilka Hyundai, která zahájila sériovou výrobu prvního tisíce vodíkových elektromobilů. Ty by se tak na silnicích měly objevit v rozmezí let 2013-2015. Z pohledu automobilového průmyslu neznamena jeden tisíc vozů velké číslo, avšak z pohledu vodíkových technologií se jedná o číslo poměrně vysoké. V roce 2012 vzniklo také 27 nových vodíkových čerpacích stanic. [10]

Závěrem tedy shrnutí vývoje trhu vodíkových aplikací za rok 2012. Dodáno bylo celkem 45 700 aplikací (18 900 přenosné, 24 100 stacionární a 2 700 dopravní). Lídrem v zavádění vodíkových technologií je Asie (28 000 jednotek), následuje Evropa (9 700 jednotek), na pomyslném třetím místě se pak umístila Severní Amerika s 6 800 novými aplikacemi. Ve zbytku světa bylo během roku 2012 instalováno 1 200 nových aplikací. Nejvíce nových aplikací bylo založeno na technologii vodíkových palivových článků s polymerní membránou (PEMFC) (40 400 aplikací), následovaly palivové články využívající jako palivo metanol (DMFC) (3 000 aplikací) a vysokoteplotní palivové články s keramickou membránou (SOFC) (2 300 aplikací). [10]

V číslech instalovaného výkonu přibýlo za rok 2012 166,7 MW. Nejvyšší podíl na tomto čísle mají stacionární jednotky (124,9 MW). 41,3 MW připadlo na aplikace v dopravě a 0,5 MW výkonu bylo ve formě přenosných aplikací. Nejvíce výkonu bylo nově instalováno opět v Asii (86,1 MW), na druhém místě se pak objevuje Severní Amerika, která s 61,5 MW výrazně předčila Evropu (17,3 MW). Z porovnání počtu dodaných jednotek a instalovaného výkonu je tak zřejmé, že ve srovnání se Severní Amerikou je v Evropě instalováno více, ale menších jednotek. Nejvíce nově instalovaného výkonu bylo opět ve formě PEMFC (68,3 MW), na druhém místě se potom objevují MCFC (62,0 MW). Může se zdát překvapivé, že MCFC nebyly zmíněny v počtech dodaných jednotek a přesto se na nově instalovaném výkonu podílejí významně. Je to dáno nízkým počtem dodaných MCFC jednotek s relativně velkým výkonem. 26,9 MW bylo instalováno jako SOFC, 9,2 MW výkonu bylo potom dodáno ve formě palivových článků, kde jako elektrolyt slouží kyselina fosforečná (PAFC). Zbývajících 0,3 MW výkonu bylo ve formě metanolových palivových článků. [10]

Tabulka 3 - Vodíkové systémy [13]

Název projektu a rok	Zdroj		Elektrolyzátor		Baterie		Úložiště vodíku			Palivové články	
	Typ	Instalovaný výkon (kWp)	Typ	Výkon (kW)	Typ	Kapacita energie (kWh)	Typ	Kapacita vodíku (Nm ³ H ₂)	Kapacita energie (kWh)	Typ	Výkon (kW)
FIRST (2000-2004)	FVE	14	PEM	1	Olověné	20	Metal-hydrid, 30bar	70	248	PEM	0,42
HARI (2002-)	FVE - mikrovodíková FVE - VE	13-50-3,2	Alkalický	36	Olověné	120	Tlakové nádrže, 137 bar	2856	10,127	PEM	7
HRI (2001 -)	FVE	1-10	Alkalický	5	Olověné	42	Tlakové nádrže, 10 bar	40	142	PEM	5
INTA (1989-1997)	FVE	8,5	Alkalický	5	-	-	Metal-hydrid - tlakové nádrže, 200 bar	24-9	85-32	PAFC-PEM	10-7,5
PHOBEUS (1993 - 2003)	FVE	43	Alkalický	26	Olověné	304	Tlakové nádrže, 120 bar	3000	10,638	PEM	5,6
SAPHYS (1994-1997)	FVE	5,6	Alkalický	5	Olověné	51	Tlakové nádrže, 200 bar	120	426	PEM	3
SCHATZ (1989 - 1996)	FVE	9,2	Alkalický	6	Olověné	5,28	Tlakové nádrže, 8 bar	60	213	PEM	1,5
Solar house (1992-1995)	FVE	4,2	PEM	2	Olověné	20	Tlakové nádrže, 28 bar	400	1418	PEM	3,5
Solar hydrogen pilot plant (1990-1992)	FVE	1,3	Alkalický	0,8	Olověné	12	Tlakové nádrže, 25 bar	200	709	PAFC	0,5
SWB (1989 - 1996)	FVE	370	Alkalický	100	-	-	Tlakové nádrže, 30 bar	5000	17,730	PAFC	80
CEC (2007-)	FVE	5	PEM	3,35	Olověné	28	Metal-hydrid, 14 bar	5,4	19	PEM	2,4

Tabulka 3 uvádí hlavní hybridní energetické systémy s "fotovoltaickým" vodíkem, které byly instalovány pro stacionární výrobu energie a jejich konkrétní specifikace. Téměř všechny byly finančně podporovány vládami, vysokými školami a vědeckými institucemi. Dále si přiblížíme některé systémy.[13]

Integrovaný systém vodíku a obnovitelných zdrojů energie (HARI) [9]. Projekt ve West Beacon Farm v Leicestershire, Anglie zkoumá možnosti ukládání energie z obnovitelných zdrojů nestálého výkonu pomocí vodíku. Projekt běží od r. 2002. Hybridní systém se skládá z 36 kW elektrolyzátoru, 2856 Nm³ tlakových nádob a dvou palivových článků 2 a 5 kW. Tento systém byl přidán ke stávajícímu systému obnovitelných zdrojů elektrické energie. Systém zahrnuje dvě větrné elektrárny s kombinovaným výkonem 50 kW, fotovoltaické pole s celkovým výkonem 13 kW a asi 3kW mikro vodní elektrárnu. Celý systém slouží k pokrytí energetických potřeb místní minisítě na farmě. Lokální distribuční síť elektrické energie je vytvořena na stejnosměrném napětí ke snadnějšímu řízení různých technologií zdrojů energie. [13]

Projekt HARI ilustruje koncept vodíkového hospodářství s cílem nezávislosti na rozvodné síti a samostatnosti pro West Beacon Farm. Cílem projektu je prokázat životaschopnost ostrovního energetického systému, a získat zkušenosti s vývojem softwarových modelů, které lze použít při návrhu podobných hybridních obnovitelných systémů. [13]

Jeden z posledních hybridních systémů s vodíkovým hospodářstvím byl nainstalován v únoru 2007 v Clean Energy Center (CEC) v areálu Pamukkale University v Denizli, Turecko [5]. Tento vodíkový systém je podporován tureckou státní plánovací organizací (TSPO) a některými soukromými společnostmi (Bereket Energy Co a Nexans Inc.). V budově jsou použity pasivní i aktivní fotovoltaické systémy vytápění. Pro pasivní vytápění jsou použity dvojitěná sklopná okna a cihly s izolační mezerou. Pro aktivní vytápění jsou na horní části domu umístěny sluneční kolektory. Cílem bylo navrhnout unikátní integrovaný systém pro dům, kde budou zajištěny všechny energetické potřeby pouze pomocí sluneční energie bez vstupů fosilních zdrojů. Pro tento účel bylo instalováno 5 kW FV pole. K zajištění kvalitní vody potřebné pro elektrolyzátor byl použit filtr a deionizer. Elektrolyzátor byl typu PEM. Pro skladování vodíku byl zvolen metalhydridový systém OVONIC 85G250B, který je velmi bezpečný a je schopen pojmout v malém objemu velké množství vodíku. Na druhé straně však vodík musí být velmi vysoké čistoty. V rámci tohoto projektu se používají v případě potřeby dva PEM palivové články NEXA k výrobě elektrické energie z uloženého vodíku. Výkonové moduly dodávají neregulovaný výkon 1,2 kW s nominálním DC výstupním napětím 26 V. [13]

Vodíkové projekty

Projekt Myrte

Projekt Myrte neboli **M**ission **h**Ydrogen & **R**enewable for the **i**n**T**egration on the **E**lectrical grid je projekt od francouzské společnosti Areva ve spolupráci s Korsickou univerzitou. Projekt se nachází u pobřeží Korsiky u La Croix Valmer. Systém se skládá ze fotovoltaické elektrárny o výkonu 560 kWp a vodíkového systému. Projekt Myrte je určen k vyhlazování špičkových výkonů elektrárny a jejích akumulací pro pozdější využití. Na Obr. 3 je fotka a jednotlivé části projektu Myrte.

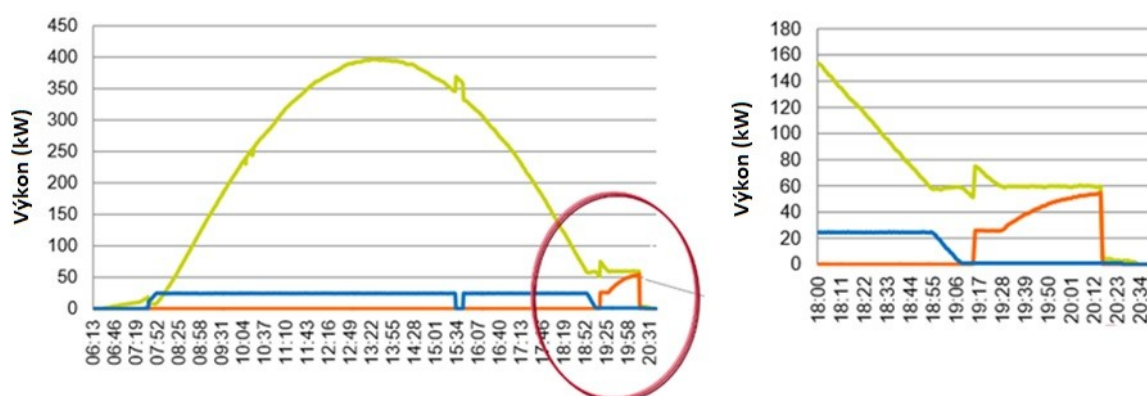


Obr. 3 - Projekt Myrte

Vodíkový systém je složen z elektrolyzéru s výrobou 25 Nm³/h vodíku, palivových článků s výkonem 200 kW a úložištěm (Obr. 4) s kapacitou 3,5 MWh elektrické energie.



Obr. 4 - Projekt Myrte



Obr. 5 - Projekt Myrte

Na Obr. 5 je možno vidět, jak celý projekt Myrte funguje. V ranních hodinách fotovoltaická elektrárna postupně se zvyšujícím se svitem Slunce zvyšuje i svoji výrobu elektřiny. Když je výkon fotovoltaické elektrárny dostatečný, dojde k zapnutí elektrolyzéru. Ten začne odebírat výkon zobrazený modře a začne se s produkcí vodíku. Ten je pak uložen do úložiště na Obr. 4. Ve večerních hodinách, kdy fotovoltaická elektrárna nemá dostatečný výkon, se snižuje výkon elektrolyzéru až k jeho úplnému vypnutí a zapnutí palivových článků. Výkon palivových článků je zobrazen oranžově. Díky tomuto systému dochází ke zlepšení dodávky elektrické energie a celkový výkon, který elektrárna dodává do sítě, je zobrazen zeleně.

Projekt INGRID



Obr. 6 - INGRID

INGRID - High-capacity hydrogen-based green-energy storage solutions for grid balancingpovídá, je projekt zabývající se vysokokapacitním vodíkově založeném skladování pro vyvažování elektrické sítě. Jeho logo je na Obr. 6. Jedná se o evropský projekt, jehož konsorcium je složeno ze sedmi firem a to z Itálie, Francie, Belgie a Španělska. Tento projekt vznikl jako výsledek neustálého růstu obnovitelných zdrojů podporovaných Kjótským protokolem a jejich velikou výrobní nestálostí, která se neblaze projevuje na distribuční síti.

Projekt bude kombinovat inteligentní sítě a vodíkové skladování tak, aby výroba z kolísajících obnovitelných zdrojů byla v rovnováze s poptávkou při současném zajištění bezpečnosti a stability distribuční sítě.

Cíle tohoto projektu:

- Vyvážit rozvodnou síť tím, že umožní ukládat přebytečnou elektřinu a používat ji k pozdější spotřebě
- Dodávat na trh vodík uložený v bezpečném pevném stavu
- Test mobility tím, že vyrobená elektřina z vodíku bude poskytována nabíjecím stanicím pro pohon automobilů

Evropské konsorcium investovalo do projektu 23,9 miliónů € na navržení a postavení energetické úschovny energie o výkonu 39MWh v Itálii oblasti Puglia. Tímto zařízením pro úschovu energie bude možno zadržet až jednu tunu bezpečně uloženého vodíku.

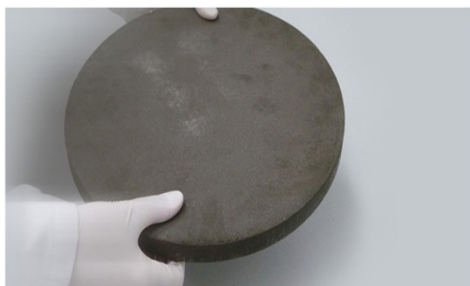
Region Puglia má již více jak 3500 MW instalovaného výkonu z fotovoltaických, větrných a biomasně založených zdrojů. Projekt bude pomocí svých 39 MWh vyvažovat místní elektrickou síť provozovanou Enel Distribuzione. K vyvažování bude použit Elektrolyzér společnosti Hydrogenics s výkonem 1,2 MW (Obr. 7) a úložištěm jedné tuny vodíku.



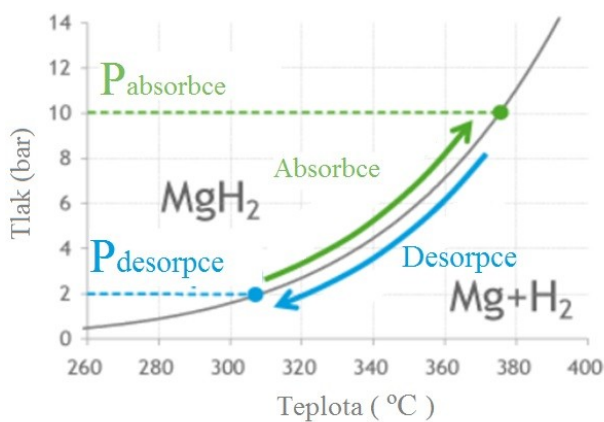
Obr. 7 - Elektrolyzér o výkonu 1,2 MW od společnosti Hydrogenics

Realizace tohoto projektu by měla být v roce 2014

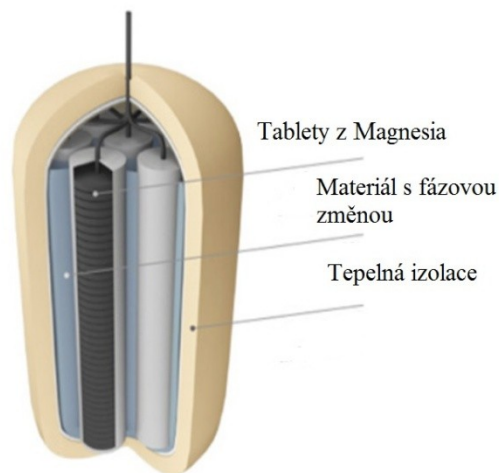
Kromě velikosti je další zajímavostí na tomto projektu i úschova vodíku. Vodík je skladňován pomocí McPhy technologií v pevném stavu v tzv. tabletách (Obr. 8). Celá "nádobá" je zobrazená na Obr. 9.



Obr. 8 - Vodík uložený v Magnesiumu



Obr. 10 - Princip ukládání vodíku v Magnesiumu



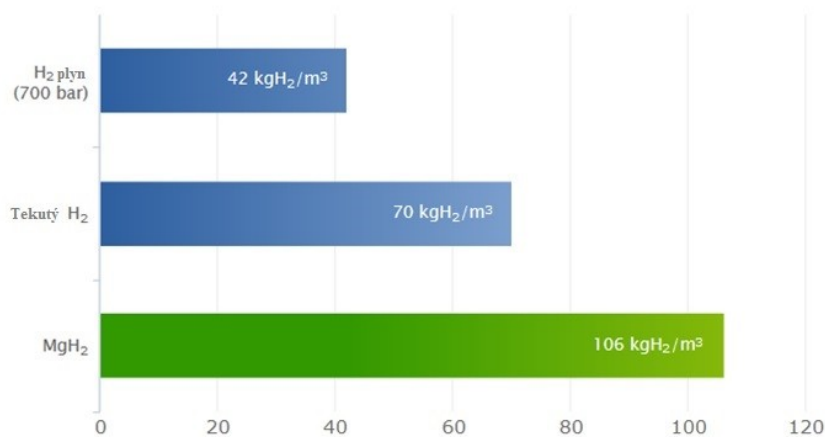
Obr. 9 - Technologie MgH_2

Princip:

Pokud pro danou teplotu je tlak nad určitou úrovní (rovnovážný tlak), kov absorbuje vodík a vzniká hybrid vodíku MgH_2 . Je-li tlak pod rovnovážným tlakem, kov se zbavuje vodíku a vrací se do normálního stavu. Rovnovážný tlak se mění přímo s teplotou dle křivky na Obr. 10.

Výhody MgH_2 :

- Zcela reverzibilní skladování
- Ukládání vodíku při typickém výstupním tlaku elektrolyzéru 10 bar
- Získávání vodíku jako paliva pro palivové články při tlaku 2 bar
- Bez komprese
- Vysoká stabilita opakovacích cyklů nabíjení a vybíjení



Obr. 11 - Srovnání technologií uložení vodíku dle kapacity

Zajímavé je srovnání na Obr. 11 této technologie skladování s ostatními. Na tomto obrázku jsou vidět kapacitní výhody této technologie.

Očekávané výstupy:

- Zvýšení celkové účinnosti na 50-60 % z aktuálních 35 % (70 % VE, 50 % PČ)
- Zvýšení Modularity - schopnosti systém lehce rozložit a znovu sestavit
- Zvýšení nabíjecích a vybíjecích cyklů bez většího opotřebení

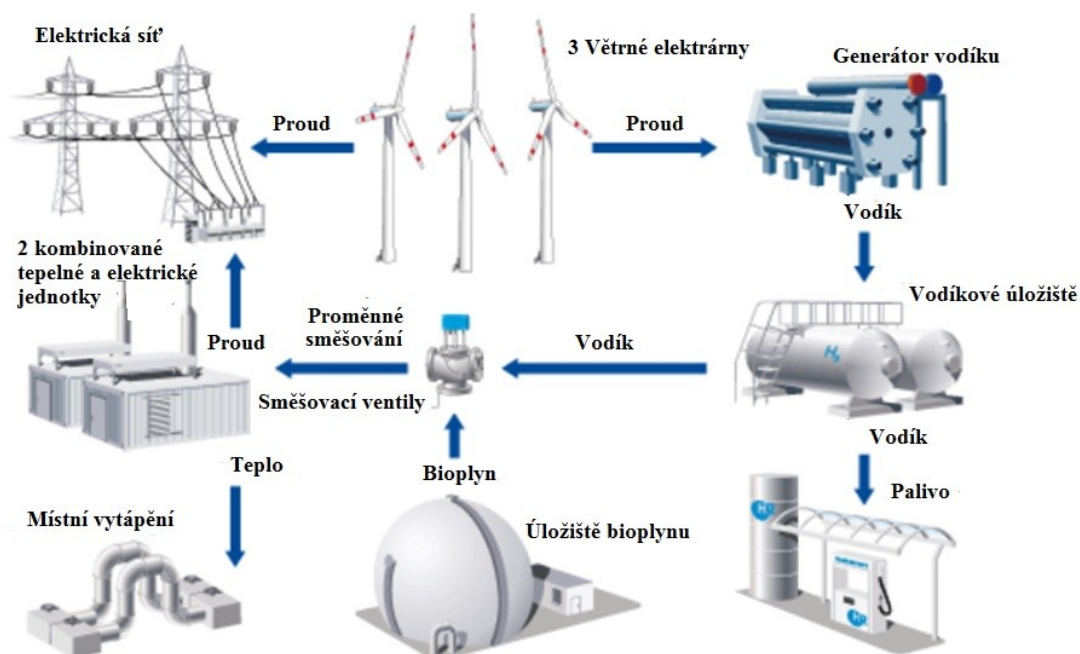
Vodíková větrná elektrárna



Obr. 12 - Větrná elektrárna s vodíkovou akumulací [15]

Společnost Enertrag se rozhodla k odvážnému kroku. V roce 2009 zahájila výstavbu větrné elektrárny (Obr. 12) spojené s vodíkovým akumulčním systémem. Samotná kancléřka Angela Merkelová při zahájení stavby položila základní kámen. Elektrárna má pomocí vodíku vyrábět a

akumulovat elektrickou energii do vodíku v době, kdy rozvodná síť je přetížená. Takto vyrobený vodík pak putuje do vodíkové čerpací stanice v TOTAL v Hamburku nebo je smíchán s bioplynem a následně využit v kogeneračních jednotkách pro výrobu tepla v domácnostech.



Obr. 13 - Schéma projektu Enertrag

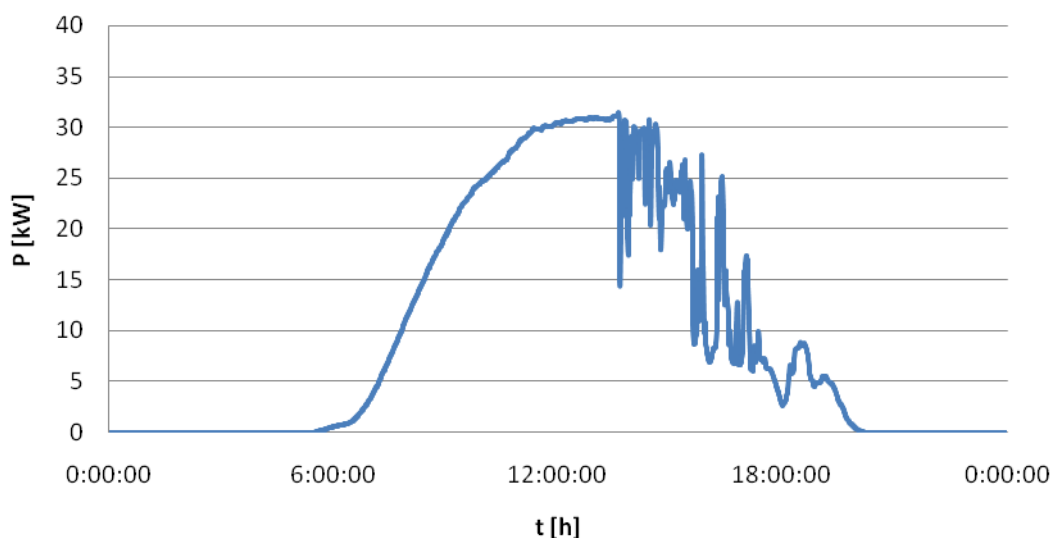
Na Obr. 13 je schéma jak projekt od společnosti Enertrag funguje. Základem jsou 3 větrné elektrárny, každá o výkonu 2 MW. Z nich jde energie do elektrolyzátoru s výkonem 500 kW ($120 \text{ Nm}^3/\text{h}$). Plyn je dále uchován, stlačen přes kompresory na 30 bar a putuje do nádrží, kde se čeká na jeho další využití. Nádrže pojmu 1 350 kg vodíku při tlaku 30 bar. Investiční náklady tohoto systému jsou kolem 21 miliónů Euro.

Možnosti výroby vodíku ve vztahu k solární energetice

Solární energetika a její problémy

Fotovoltaika využívá přímé přeměny světelné energie na elektrickou energii v polovodičovém prvku označovaném jako fotovoltaický nebo také solární článek. Fotovoltaický článek se skládá z velkoplošné diody, s alespoň jedním PN přechodem. Dopadá-li na fotovoltaický článek sluneční záření, generují se v něm elektricky nabitě částice. V polovodiči se z krystalové mřížky začnou uvolňovat záporné elektrony. Dojde k izolaci elektronů a děr vnitřním elektrickým polem PN přechodu. Rozdělení má za následek vznik rozdílného potenciálu mezi kladným a záporným kontaktem fotovoltaického článku a vznikne elektrické napětí, které u křemíkových diod dosahuje hodnoty zhruba 0,5 V. Připojí-li se mezi oba kontakty spotřebič elektrické energie, obvodem začne protékat elektrický proud, který bude závislý na velikosti článku a intenzitě slunečního záření. [4]

Typickou vlastností fotovoltaické elektrárny je, že její okamžitý dodávaný výkon, je přímo úměrný intenzitě dopadajícího slunečního záření. Sluneční záření kolísá v závislosti na natočení Země vůči Slunci a na povětrnostních vlivech. Tomu odpovídá dodávaný výkon fotovoltaické elektrárny, který se může pohybovat ve škále celého instalovaného výkonu, v časovém intervalu i několika minut. Tento jev s sebou přináší řadu komplikací, se kterými se musí provozovatel distribučních sítí vypořádat. [4] Na Obr. 14 je ukázka takového nestálého výkonu.



Obr. 14 - Ukázka nestálého výkonu fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaické elektrárny jsou do distribuční sítě připojovány přes výkonové transformátory. Jedná-li se o elektrárnu velkého výkonu připojenou do distribuční soustavy na konci paprskového vedení, mohou nastat nepříznivé jevy nejen pro distribuční síť. Nastane-li stav, že dojde k nárůstu dodávky elektrické energie z fotovoltaické elektrárny, a současně k poklesu odběru elektrické energie

v síti, dojde ke zpětnému toku činného výkonu výkonového transformátoru, což způsobí zvýšení napětí v přípojném bodě. U sítě 110 kV ovšem tento jev nepředstavuje významný problém. [4]

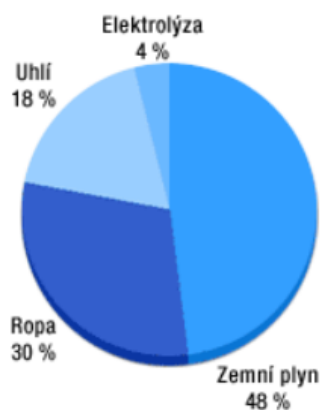
V sítích 22 kV je situace opačná. Tyto sítě jsou provozovány jako radiální, napájené z jedné strany. K jejich ochraně dříve stačily nesměrové nadproudové ochrany. S možností otočení směru toku výkonu přichází nutnost instalovat ochrany směrové a řešit nové poruchové stavy. Tato skutečnost znamená pro provozovatele distribuční sítě jistě značné náklady na investice do rozvoje této sítě. Dispečeri se svými řídicími programy musí být připraveni na nové provozní stavy sítě tak, aby byli schopni správně vyhodnotit případné poruchy v ní. [4]

Jedinou možností, jak omezit tento zpětný tok, je snížit výrobu v decentralizovaných nebo jiných zdrojích. V případě fotovoltaických elektráren ovšem vzniká ekonomický problém z důvodu zajištěné dotace na výkupní ceny z těchto energetických zdrojů. Protože majitelům elektráren omezování výroby snižuje zisky. [4]

Jak již bylo řečeno, fotovoltaická elektrárna je zdrojem nestálého výkonu, který se mění až v rozmezích 80 % celkového výkonu a občas její vyrobená elektřina přichází v niveč kvůli stabilitě sítě. Spolu s vodíkem se zde nabízí otázka, zda bychom byli schopni tuto elektrickou energii akumulovat nebo spíše regulovat a tyto přebytky využít později.

Výroba vodíku

Velká část vyráběného vodíku (48 %) pochází v současné době z úpravy zemního plynu. Pouze 4 % vodíku (Obr. 15) se dnes získávají z čisté elektrolýzy, při které je voda za přívodu elektrické energie rozložena na své elementární součásti, vodík a kyslík. [9]



Obr. 15 - výroba vodíku [9]

- K získání jednoho metru krychlového vodíku pomocí elektrolýzy je zapotřebí 4,8 kWh elektrické energie. V budoucnu by mohl být vodík získáván výhradně pomocí obnovitelné energie, jako je větrná a fotovoltaická.

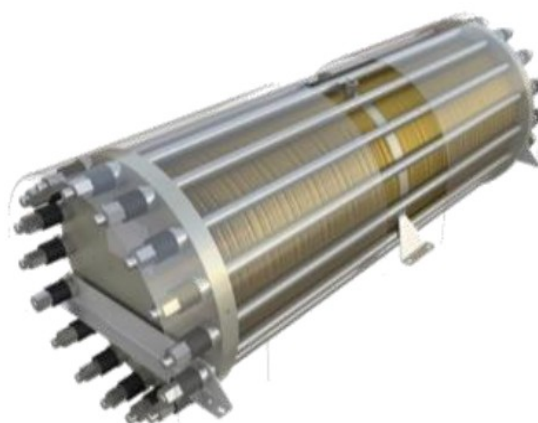
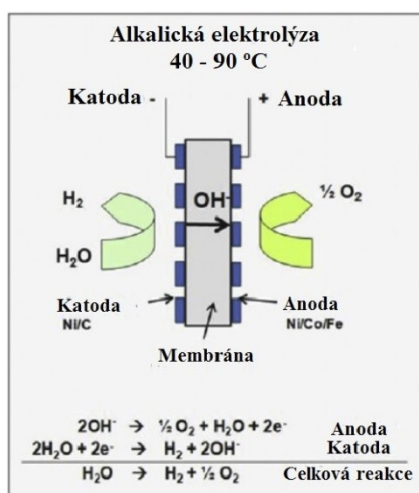
- Kolem 95 % v současnosti vyráběného vodíku je ihned využíváno ve spotřebitelském průmyslu.
- Celosvětově se vyráběné množství vodíku v současnosti pohybuje ročně kolem 45 milionů tun a stačilo by na pohon 250 milionů vozidel.
- Vodík bude pokrývat spotřebu energie budoucnosti. Dnešní celková výroba však představuje pouhé 1 % spotřeby energie lidstva [9]

Mezi nejsnadnější výrobu vodíku patří výroba z elektrolýzy vody. Základní princip výroby vodíku pomocí elektrolýzy je v rozkladu molekul vody působením stejnosměrného elektrického proudu ve vhodném roztoku. Účinnost elektrolýzy je kolem 80 % i více. Výstupem kromě vodíku je i kyslík.

Jeden z dalších způsobů elektrolýzy je vysokoteplotní elektrolýza. Pro vysokoteplotní elektrolýzu, nazývanou též někdy parní elektrolýza, je charakteristické, že část dodávané energie tvoří elektrická energie a část je přivedena ve formě tepla, čímž je zvýšena celková účinnost procesu oproti klasické elektrolýze vody. Reakce probíhající ve vysokoteplotním elektrolyzátoru je reverzní k reakci probíhající v palivových článcích s pevnými oxidy. Do elektrolyzátoru vstupuje vodní pára a vodík; vystupuje z něho obohacená směs obsahující 75 % vodíku a 25 % páry. Vodík je pak z páry oddělen v kondenzační jednotce. [17]

Alkalická

Alkalická elektrolýza se stala velmi pokročilou technologií pro výrobu vodíku až do řádu megawattů a představuje nejvíce rozšířené elektrolytické technologie na obchodní úrovni po celém světě. Konstrukce je jednoduchá a vyznačuje se tím, že má dvě elektrody ponořené do kapaliny alkalickém elektrolytu, který se skládá z roztoku hydroxidu draselného v množství 20-30 % KOH . Obě elektrody jsou od sebe odděleny membránou, která má funkci udržování produkčních plynů od sebe z důvodu účinnosti a bezpečnosti. Membrána musí být propustná pro hydroxidové ionty a molekuly vody . [12] Jak alkalická elektrolýza probíhá je na Obr. 16 společně s elektrolyzérem.



Obr. 16 - Alkalická elektrolýza - princip a foto elektrolyzátoru

Tři hlavní problémy, které jsou obvykle spojeny s alkalickými elektrolyzéry

- nízké částečné zatížení
- omezené proudové hustoty
- nízký provozní tlak

První nevýhodou je, že membrána elektrolyzéru není schopna zcela zabránit styku kyslíku s vodíkem. Difúze kyslíku do katodové komory snižuje účinnost elektrolyzéru, protože kyslík je katalyzován zpět do vody spolu s vodíkem přítomným na katodové straně. Navíc, rozsáhlejšímu smíchání (hlavně šíření vodíku do vyústě komory kyslíku) je třeba se vyhnout, aby se zachovala účinnost, jakož i bezpečnosti. To je zvláště závažné při nízkém zatížení ($< 40\%$), kde se snižuje rychlost výroby kyslíku, čímž se výrazně zvyšuje koncentrace vodíku na nežádoucí a nebezpečné úrovni (dolní mez výbušnosti $> 4\text{ mol } \% \text{ H}_2$). [12]

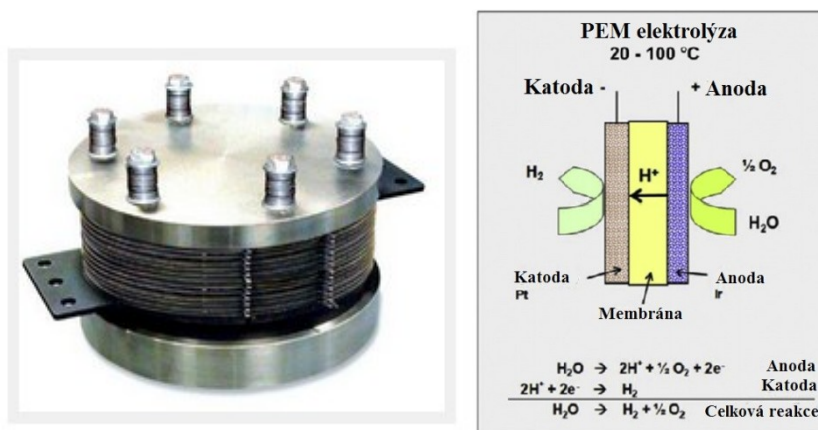
Druhou nevýhodou pro alkalické elektrolyzéry je nízká maximální proudová hustota, vzhledem k vysoké ohmické ztrátě v celém kapalném elektrolytu a membráně. [12]

Třetím problémem, který je přičítán tekutému elektrolytu, je neschopnost pro provoz při vysokém tlaku, což způsobuje v praxi velké rozměry elektrolyzéru. [12]

PEM elektrolýza

Tento koncept elektrolýzy je označována jako PEM (Proton Exchange Membrane - membrána s protonovým přechodem) nebo Polymer Elektrolyt Membrane (membrána z polymerového elektrolytu). Poněkud méně častý název této elektrolýzy je SPE (Solid Polymer Elektrolyte - elektrolyt z pevného polymeru). [12]

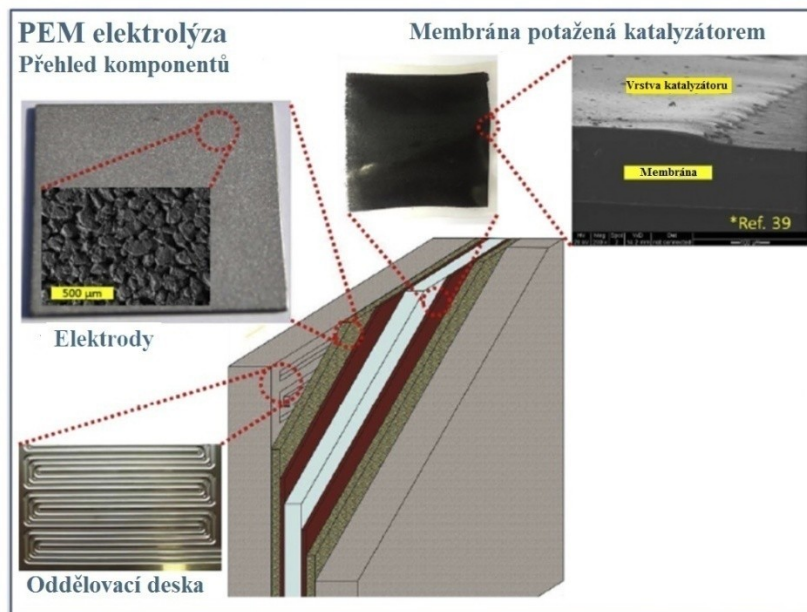
PEM elektrolýza se řadí, podobně jako alkalická, mezi nízkoteplotní druhy elektrolýz. Membrána je tvořena z polymerového elektrolytu (Nafion, fumapem), který způsobuje vysokou protonovou vodivost, nízké vzájemné smíchání plynu a schopnost pracovat za vysokého pracovního tlaku. Malá tloušťka membrány (tloušťka 20-300 μm) je částečným důvodem, proč má pevný polymer mnoho výhod. [12] Princip PEM elektrolýzy společně s elektrolyzérem je na Obr. 17.



Obr. 17 - PEM elektrolýza + foto elektrolyzéru

Složení PEM článku:

Na Obr. 18 je detailně zobrazen jeden článek typu PEM.



Obr. 18 - Komponenty článku PEM

PEM článek se kromě membrány skládá ještě z těchto komponent:

Oddělovací desky (Separator plate) - slouží pro rozvod plynů a jsou vyrobeny z grafitu. Serpentinovitého tvaru jsou proto, aby maximalizovaly kontakt plynu s membránovým uspořádáním.

Katalyzátor - podporuje reakci, je tvořen z platiny nebo niklu o tloušťce řádově desítky μm .

Elektrody - jsou vyrobeny z papíru protkaného uhlíkovými vlákny o tloušťce desetin mm, který je porézní, nesmáčenlivý, vodivý a nekorodující.

Celému tomuto uskupení se také říká MEA - Membrane Electrode Assembly. Za deskami s kanálkami se nacházejí ještě koncové desky, které slouží ke spojení více uskupení MEA dohromady.

Pozitivní aspekty

PEM elektrolyzéry mohou pracovat za mnohem vyšších proudových hustot, které mohou dosáhnout hodnot nad 2 A/cm^2 , což snižuje provozní náklady a potenciálně celkové náklady elektrolyzy. Velká proudová hustota je dána nízkými odporovými ztrátami a dobrou iontovou vodivostí elektrolytu. Membrána s polymerovým elektrolytem je tenčí než v alkalických elektrolyzérech. [12]

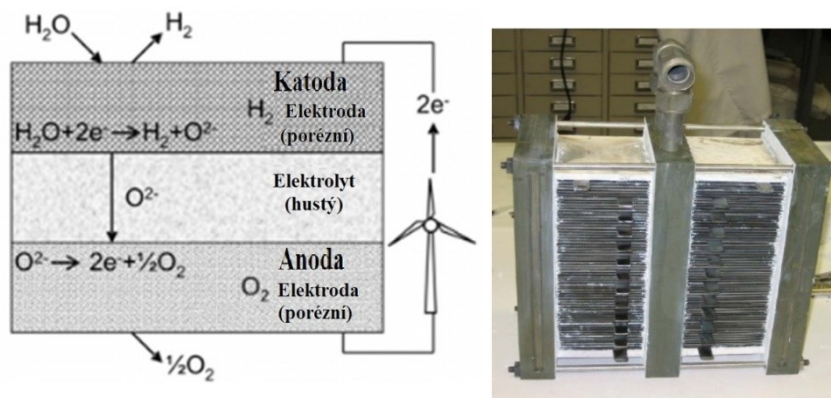
Membrána z polymerového elektrolytu má nízkou zpětnou propustnost plynů, takže nedochází k velkému smíchání vodíku s kyslíkem jako u alkalických elektrolyzérů. Díky tomu umožňuje PEM elektrolyzéru vyrábět velmi čistý vodík a pracovat v širokém rozsahu příkonů (ekonomické hledisko).

To je způsobeno tím, že proton, který se transportuje přes membránu, rychle reaguje na vstupní napájení a není zpožděn setrvačností jako v kapalném elektrolytu. Jak bylo uvedeno výše, u alkalických elektrolyzérů působící při nízkém zatížení, se rychlost výroby vodíku a kyslíku snižuje, zatímco vodíková propustnost membrány zůstává konstantní, čímž se získá mírné zlepšení celkové účinnosti a to zejména při vysokých proudových hustotách. [12]

Negativní aspekty

Problémy membrány z polymerového elektrolytu jsou spojené s vyššími provozními tlaky v PEM elektrolyzéru. Při vyšších tlacích se zvětšuje i množství nežádoucí propustnosti plynů skrze membránu. Tlaky nad 100 bar budou vyžadovat použití silnějších membrán a vnitřní rekombinátory plynů k udržení kritické koncentrace (většinou H_2 v O_2) pod prahem bezpečnosti (4 % H_2 v O_2). Nižší propustnost plynu přes membránu lze získat začleněním různé výplně v materiálu membrány, to ale většinou vede k použití méně vodivých materiálů. [12]

SOEC



Obr. 19 - SOEC elektrolýza + elektrolyzér

SOEC - Solid Oxide Electrolysis Cells. Do elektrolýtického článku vstupuje pára a elektrická energie z vnějšího zdroje napájení. SOEC také dokáže pomocí elektrolýzy rozdělit směs páry a oxidu uhličitého, tzn., že je možné rozdělit CO₂ na CO a O₂. Princip SOEC elektrolýzy a SOEC elektrolyzér jsou na Obr. 19. Pro endotermické reakce, jako je elektrolýza H₂O nebo CO₂, je z termodynamického hlediska výhodné pracovat při vysoké teplotě. Vysoká teplota slouží k získání dostatečné energie potřebné pro štěpení vody. Vysoká teplota pak snižuje spotřebu elektrické energie potřebnou k elektrolýze, což je výhoda oproti nízkoteplotním elektrolýzám. Kromě toho, rychlost reakce je s teplotou vyšší a to vede ke snížení vnitřního odporu a ke zvětšení účinnosti. SOEC elektrolýza pracuje při teplotách 750 - 950 °C. [8]

Švýcarská společnost ALMUS AG zahájila prodej demonstrační soupravy vysokoteplotního palivového článku, určeného pro akademické instituce. Celá souprava se dodává v kompaktním kufříkovém balení, aby byl zajištěn bezpečný transport všech součástí. Dodávaný palivový článek dokáže kromě vodíku využívat také uhlovodíky. Sada obsahuje všechny důležité komponenty k demonstraci funkce vysokoteplotního palivového článku, tedy vyhřívání, zařízení pro sledování výkonu v závislosti na teplotě a umožňuje také sledovat vliv průtoku paliva i oxidovadla na provozní

parametry článku. Sestavení celého systému by mělo trvat méně než tři minuty. Pracovní teploty 600 °C potom palivový článek dosáhne díky elektrickému vyhřívání během 20 minut. Se vzduchem a vodíkem, který je uskladněn v metal hydridovém materiálu, dosáhne palivový článek výkonu 10 W při napětí 12 V. Standardně dodávaný modul je vybaven článkem s 16 celami o rozměrech 60 x 60 mm². K dostání je také verze určená pro laboratorní testování. Ta je vybavena článkem s 48 celami a výkonem až 200 W. Cena samotného vysokoteplotního palivového článku je podle stránek výrobce 6500 švýcarských franků, tedy přibližně 135 tisíc Kč, celý set včetně přepravního kufru pak vyjde na 9600 švýcarských franků (cca 200 tisíc Kč). Výrobce však očekává, že s rostoucím počtem vyrobených kusů dojde zároveň k poklesu ceny.[11]

Zhodnocení

V tabulce jsou zobrazeny a porovnány technické parametry všech tří elektrolýz včetně jejich výskytu. V tabulce 5 je provedeno srovnání výhod a nevýhod.

Tabulka 4 - Technické parametry elektrolýz

Parametry	Pokročilá alkalická elektrolýza	PEM elektrolýza	SOEC elektrolýza
Výskyt	Prototypy + komerční použití	Prototypy + komerční použití	Laboratoře
Napětí článku [V]	1,5 - 2,5	1,4 - 2	0,95 - 1,3
Proudová hustota [A/cm ²]	0,2 - 2	1 - 4	0,3 - 1
Teplota [°C]	80-145	80-150	750-950
Tlak [bar]	Až do 120	Až do 400	Až do 30
Účinnost článku v elektrolýzáru [GJ H ₂ /GJ el.]	69-77	73-84	81-86

Tabulka 5 - Srovnání výhod a nevýhod elektrolýz

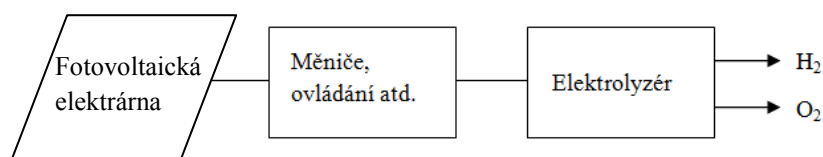
Výhody a nevýhody jednotlivých typů elektrolýzy		
Alkalická	PEM	SOEC
Výhody		
<ul style="list-style-type: none"> • Osvědčená technologie • Bez ušlechtilého katalyzátoru • Dlouhodobá stabilita • Relativně nízká cena • Stacky řádově v MW rozsahu • Investičně výhodné 	<ul style="list-style-type: none"> • Vysoká proudová hustota • Vysoká napěťová účinnost • Dobrý rozsah zátěže • Rychlá odezva systému • Kompaktní systém • Vysoká čistota plynu • Dynamický provoz 	<ul style="list-style-type: none"> • Vysoký tlak při provozu • Velmi vysoká účinnost • Bez ušlechtilého katalyzátoru
Nevýhody		
<ul style="list-style-type: none"> • Nízká proudová hustota • Nízká čistota plynů • Nízká škála zatížení • Nízká dynamika • Nízké provozní tlaky • Žíravý elektrolýt 	<ul style="list-style-type: none"> • Vysoké náklady na komponenty • Kyselé žíravé prostředí • Nízká trvanlivost • Komercializace • Stacky pod MW rozsahem 	<ul style="list-style-type: none"> • Pouze v laboratořích • Mohutné systémy • Nízká trvanlivost • Nespolehlivé informace o nákladech

Druhy vodíkových systémů se solární elektrárnou

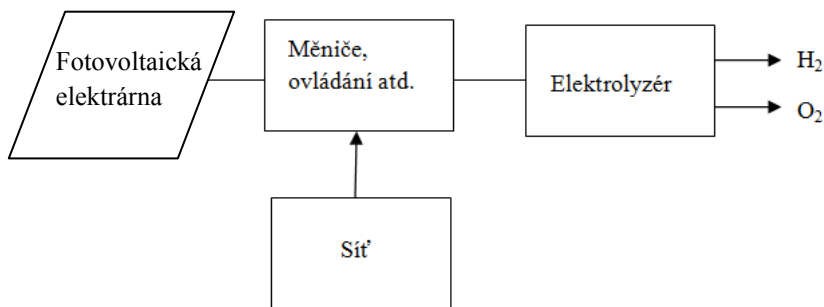
Druhů vodíkových systémů je spousta. Celkově je možno je rozdělit na dva základní druhy. Ty, které jsou připojeny k síti (ongrid) a ty, které pracují v takzvaném ostrovním režimu (offgrid).

Na Obr. 20 je zobrazen systém, který má tři základní části a je určen pro ostrovní režim. Základem je fotovoltaická elektrárna, která slouží jako zdroj. Kromě fotovoltaických elektráren se podobné výkonové systémy dají využít i pro elektrárny větrné, které mají podobně stejně nestálou dodávku výkonu. Výkon z fotovoltaické elektrárny je dále upraven pomocí měniče.

Takovýto ostrovní systém by se dal použít tam, kde by byla poptávka pouze po vodíku, jakožto konečném výstupu. Pokud by investiční náklady tohoto systému byly rozumné a vyplatily se, mohly by si takovéto vodíkové stanice postavit například u elektráren, kde vodík slouží jako chladicí medium. Pokud bychom byli v otázce vodíku, jako paliva budoucnosti pro naše auta, optimističtí, mohly by na podobném systému fungovat odlehlé vodíkové čerpací stanice, u kterých není dodávka elektřiny a u kterých by bylo vodíkové doplňování buď neekonomické, nebo obtížné např. pro velkou dopravu.

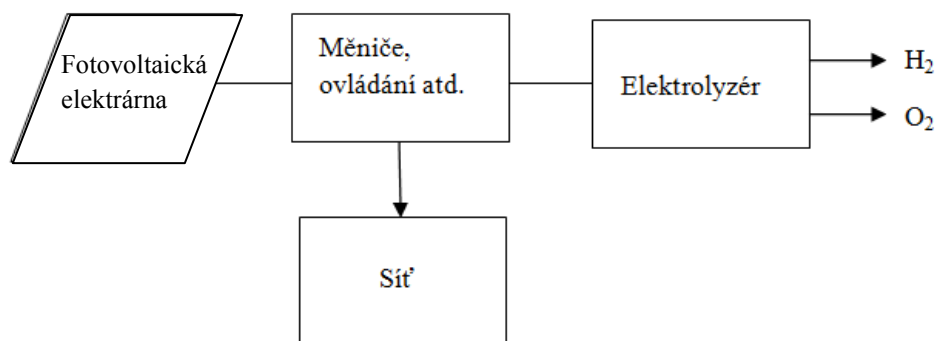


Obr. 20 - Systém pro dodávku vodíku (offgrid)



Obr. 21 - Systém pro dodávku vodíku se spoluprací sítě (ongrid)

Na Obr. 21 je zobrazen systém, který k výrobě vodíku používá i dodávku ze sítě. Elektrolyzér v takovémto systému není tolik namáhán výkonovými výkyvy, neboť nedostatek energie z fotovoltaické elektrárny je hrazen ze sítě. Konečným výstupem toho systému je opět vodík i kyslík. Tento systém by se dal použít obdobně jako předchozí. Nevýhodou by byla však nutná přítomnost napájecího bodu ze sítě. Výhodou tohoto systému je však stabilní dodávka vodíku.



Obr. 22 - Systém pro dodávku vodíku a elektřiny (ongrid)

Další možnost zapojení vodíkových systémů je na Obr. 22. Výstupem takového systému už není, jako v předchozích případech, jen vodík popř. kyslík, ale i elektřina. Systém rozdělí výkon fotovoltaiické elektrárny na dvě části. První z nich je konstantní výkon a druhý je výkon špičkový (nad stanovenou mez). Takovýto systém může fungovat dvěma různými způsoby.

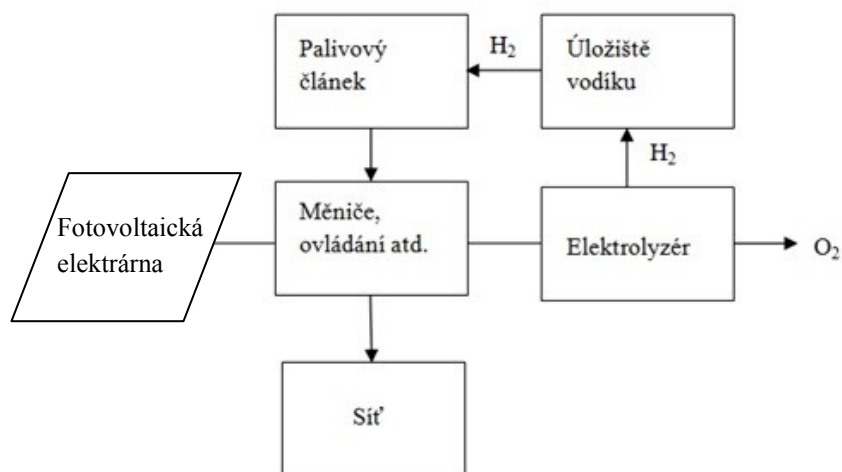
a) Do elektrolyzérů jde špičkový výkon (nad stanovenou mez)

V tomto případě jde do sítě konstantní výkon nastavený systémem a do elektrolyzérů jde přebytečný výkon. Z hlediska sítě je tento způsob výhodný, neboť nedochází k velkým nárázům výkonu do sítě a ta se pak lépe reguluje. Z hlediska elektrolyzérů, který spotřebovává nechtěný přebytečný výkon, je však věc horší, neboť by často měnil svoje zatížení ve velkém rozsahu nebo by se dokonce často vypínal/zapínal. Takovýto provoz by se velmi projevil na jeho životnosti a při výběru typu elektrolyzérů by hrál hlavní roli.

b) Do elektrolyzérů jde konstantní část.

Tento způsob je šetrný k elektrolyzérům, neboť do něj vstupuje poměrně stálý výkon. Zbylý výkon z fotovoltaiické elektrárny jde do sítě. Tento výkon je kolísavý, což z dispečerského hlediska skrze regulaci sítě, je nemilé. Jelikož je tento výkon ochuzen o konstantní část, je tedy menší než celkový výkon, je pochopitelně i amplituda změn menší, což je k regulaci příznivější.

Celkově systémy na Obr. 20 a Obr. 21 si lze představit i pro využití v domácnostech. Elektřina, která se v domácnosti nespotřebuje, je přeměněna na vodík a ten je uložen do úložiště na pozdější využití. Vodík by se mohl spotřebovávat pro účely vaření či výroby tepla. Pokud se někdy lidstvo dočká aut na vodík, mohl by sloužit pro domácí "natankování".



Obr. 23 - Systém pro dodávku elektřiny (ongrid)

Jeden ze složitějších systémů, které se momentálně hodně testují, je rovněž obsahem mé diplomové práce. Blokové schéma systému je na Obr. 23. Systém pracuje podobně jako systém z Obr. 22. I zde se výkon z fotovoltaické elektrárny rozdělí na dvě části. Ve většině případů jde o systém, který je určen ke zlepšení dodávky elektrické energie, takže hlavním výstupem je elektřina. Přebytek je zde přenesen do elektrolyzátoru, který z něj vyrobí vodík. Ten je pak vložen do úložiště, které napájí, v případě potřeby elektrické energie, palivové články. Díky tomu se tak může dosáhnout prodloužení konstantní dodávky elektrické energie až do večerních hodin, kdy už elektrárna nevyrábí. Systém by se hodil pro použití jak u velkých elektráren v rámci MWp, tak i těch menších, řádově v kWp. V rámci MWp by bylo pro distribuci vhodné, aby byl systém regulovatelný z dispečinku a dispečer měl tak kontrolu, kolik výkonu bude dodávat a kolik si uschová pro pozdější využití.

Pokud by místo sítě napájel systém nějaký objekt, mohl by systém fungovat jako ostrovní. Jako příklad bych uvedl třeba chatu, která je navštěvována jednou za čas. Fotovoltaická elektrárna by přes dny, kdy je chata prázdná, napájela elektrolyzátor, který by plnil úložiště vodíku dostatečně velké pro napájení chaty na několik dní. Pokud by majitel přišel na víkend, stačilo by pouze, aby dal systému vědět o nutnosti dodávky elektřiny a chata by jela zcela sama bez nutnosti připojení k síti. Podobný koncept má uplatnění kdekoli a podobný ostrovní režim je vybudovaný v laboratoři VŠB na ulici Krásnopolská.

Nevýhody takového systému jsou však stále stejné. Kromě nestálé dodávky příkonu do elektrolyzátoru je zde hlavní problém i účinnost celého takového cyklu. Jestliže se vezme v úvahu účinnost elektrolyzátoru 80 % a účinnost palivového článku 50 %, získá se nějakých 40 %. To znamená, že přibližně jen 40 % z celkové energie, která se uschová, je využita ve formě elektřiny zpět. Takovýto systém je v dnešní době také poměrně nákladný. Existuje mnoho jiných způsobů, jak přebytečnou energii akumulovat na pozdější využití a s poměrně lepší účinností i cenou. Vodíkové hospodářství je však stále ve vývoji a je možné, že až technologie lépe pokročí budou podobné systémy základem každé fotovoltaické či větrné elektrárny.

Návrh systému pro akumulaci solární energie do vodíku

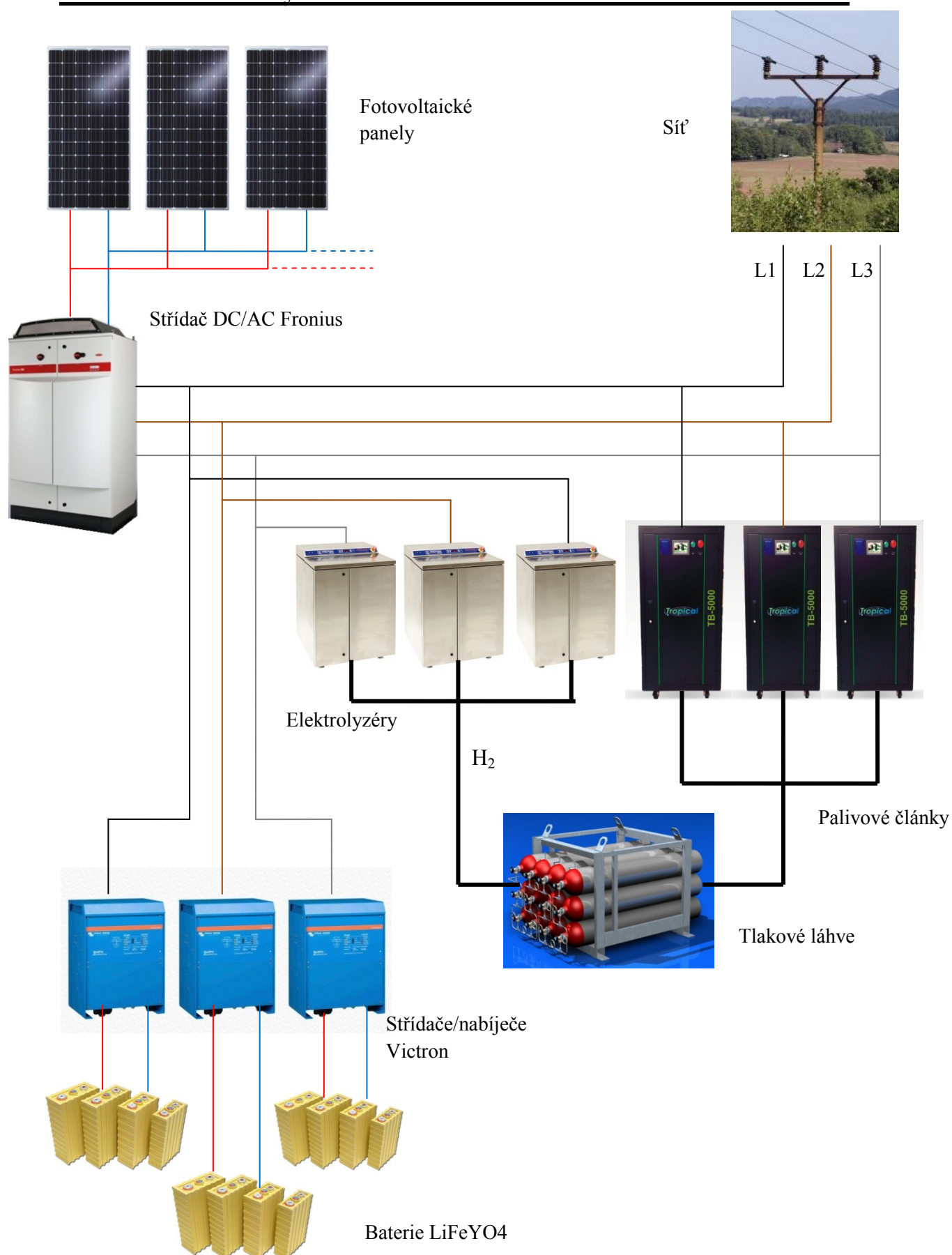
Vodíkový akumulací systém

V této části své diplomové práce se pokusím provést teoretický návrh vodíkového akumulacího systému. Tento vodíkový systém nebo systémy budu navrhovat na fotovoltaickou elektrárnu o instalovaném výkonu 40 kWp s vlastním střídačem Fronius. Cílem systémů bude akumulovat část elektrické energie v době přebytku a opětovně ji využít v době jejího nedostatku, tedy ve večerních hodinách. V návrhu se pokusím přiblížit a poukázat na hlavní problematiku podobných systémů. Samotný návrh však bude jen teoretický. Realizace vodíkového systému není jednoduchá záležitost a vyžadovala by mnohem detailnější pohled na návrh, než je mi umožněno v této diplomové práci.

V první části návrhu je zobrazeno blokové schéma, jak bude systém/systémy zapojen a jejich návaznost na sebe. V další části rozeberu jednotlivé komponenty systému/systémů a jejich úlohu. Dále pak vysvětlím logiku provozu, jak bude systém/systémy fungovat, případně, jak se budou od sebe lišit. V další části návrhu se budu zabývat parametry, jako je výpočet účinnosti a životnosti. V neposlední řadě pak uvedu, jak by měl být takovýto systém jištěn z pohledu bezpečnosti. Nakonec se budu zabývat jeho skutečným provozem a jeho očekávanými problémy. Určení investičních nákladů a nákladů provozních je rozebráno v další kapitole.

Vodíkové technologie se díky rostoucímu zájmu dají již v dnešní době úspěšně koupit. Několik málo zahraničních firem momentálně nabízí některé svoje produkty a trh se tak začíná pomalu zaplňovat.

Blokové schéma systému



Komponenty systémů

Fotovoltaická elektrárna



Obr. 24 - Fotovoltaický panel

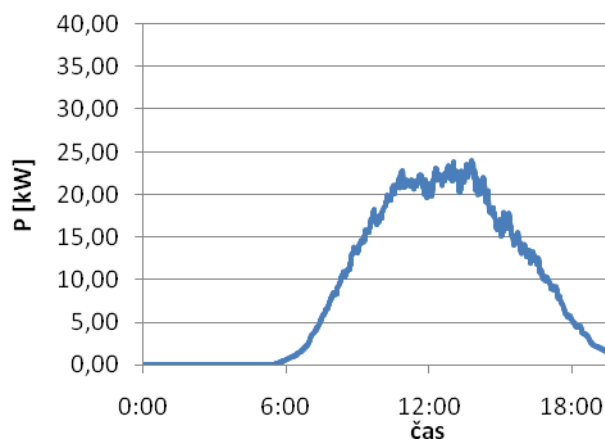
Můj vodíkový akumulací systém je navržen na fotovoltaickou elektrárnu složenou ze 135 kusů monokrystalických panelů typu SOLARWATT M300-72 AC a výkonu 300 Wp (Obr. 24). Účinnost monokrystalického článku je 17 %. Panely jsou zapojeny do 15 větví, v každé větvi je 9 modulů. Celkový výkon elektrárny je 40 kWp. Elektrárna byla uvedena do provozu v roce 2010 a její záruka je 25 let. Po 25 letech klesne její výkon na 80 %.

Technické údaje:

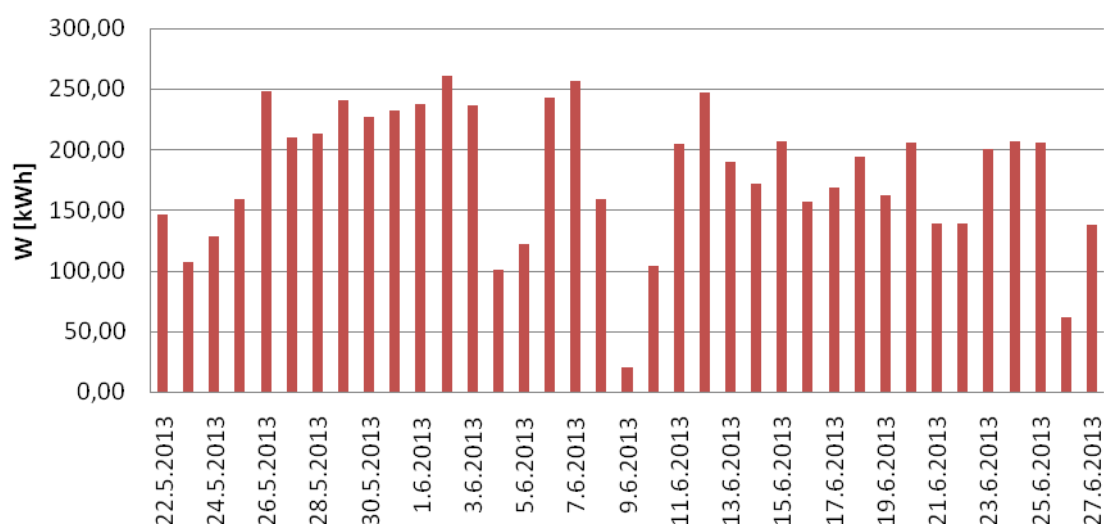
Jmenovitý výkon (P_n)	300	Wp
Jmenovité napětí (U_{mpp})	36,3	V
Jmenovitý proud (I_{mpp})	8,26	A
Napětí naprázdno (U_{0c})	45,5	V
Proud na krátko (I_{sc})	8,39	A

Popis v systému:

Data pro můj návrh fotovoltaické elektrárny byla naměřena v době od 22.5. 2013 - 27.6.2013. Za tuto dobu elektrárna vyrobila 6 645,458 kWh elektrické energie. Na Obr. 25 je vidět průměrně vyrobený výkon fotovoltaickou elektrárnou během dne za sledované období. Jak lze vidět, její výkon nepřesáhne 30 kW. Za sledované období průměrně elektrárna vyrobí 179 kWh elektrické energie a její výroba je zobrazena na Obr. 26. Jako referenční den, na kterém budu popisovat logiku systémů, jsem zvolil 3.6. Jeho průběh je i na Obr. 14 - Ukázka nestálého výkonu fotovoltaické elektrárny. Tento den jsem vybral kvůli dostatečně velké produkci a také kvůli kolísavému průběhu produkce v druhé půli dne. Pro ukázkou systémů jsem vybral dny 2.6. - 4.6. V tomto termínu je den, kdy elektrárna vyrobí nejvíce, i den, který se řadí mezi ty nejslabší. Díky tomu je možné sledovat provoz systémů za různých výrobních podmínek.



Obr. 25 - Průměrný den



Obr. 26 - Vyrobená elektrická energie

Střídač



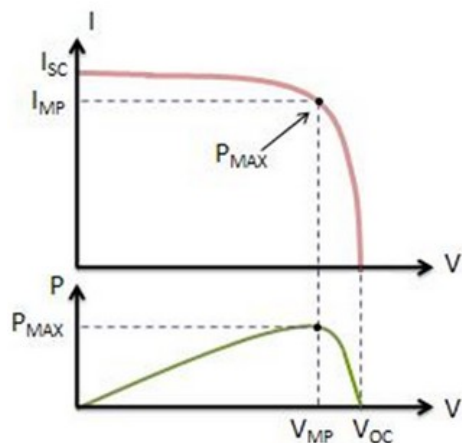
Obr. 27 - Střídač Fronius CL 44.4

Fotovoltaická elektrárna je připojena na střídač Fronius CL 44.4 DELTA (Obr. 27). Tento střídač obsahuje inteligentní moduly manager, který rychle najde bod maximálního výkonu (MPP) neboli bod pro maximální výkon pro zajištění nejlepšího výnosu. Bezpečnost je provedena galvanickou izolací. Střídač Fronius má zobrazovací displej pro jednoduchou obsluhu. Střídač také obsahuje integrovanou ComCartu s dostatečným prostorem pro Datalogger. Tento střídač je pak připojen na distribuční síť 400/230 V. Vstupní údaje, které mi k návrhu posloužily, byly měřeny na střídavé části a to v období od 22.5.2013 - 27.6.2013

Technické údaje:

Max. vstupní napětí (při 1000 W/m ² , -10°)	600	V
Rozsah napětí MPP	230 - 500	V
Výkon fotovoltaického zařízení	37,8 - 52	kWp
Max. vstupní proud	205	A
Jmenovitý výstupní výkon	44,4	kW
Max. účinnost	94,3	%
Účinnost Euro	95,9	%
Jmenovité napětí / frekvence	3NPE~400/50	Hz
Činitel zkreslení	< 3	%
Účinník	1	
Vlastní spotřeba	15	W

Popis v systému:



Obr. 28 - MPP bod

Úkolem střídače Fronius je kromě převodu stejnosměrného napětí na střídavé i hledání tzv. maximálního pracovního bodu MPP - **Maximum Power Point** (Obr. 28). Fotovoltaická elektrárna má svůj optimální bod, kdy je schopna dodávat svůj maximální výkon. Tento bod není vždy stejný, neboť fotovoltaická elektrárna často mění svůj výkon v závislosti na velikosti dopadající sluneční energie. Střídač Fronius nebo spíše MPP tracker, který střídač obsahuje, pomocí algoritmu takovýto bod neustále hledá a nastavuje parametry podle něj. Díky střídači tak může fotovoltaická elektrárna dodávat vždy svůj maximální možný výkon, takže se sníží ztráty i množství panelů pro danou velikost výkonu.

Elektrolyzéry



Elektrolyzéry jsem vybral od společnosti Protononside typ Hogen (Obr. 29). První z nich je většího výkonu a řady H. Nižší je řady S. Jedná se o nízkoteplotní elektrolyzéry typu PEM. Tyto typy produkují velmi čistý vodík se střední velikostí výstupního tlaku. Elektrolyzér je složený ze tří elektrolyzujících článků a systémů pro provoz, ochranu a regulaci. Jednotka obsahuje spoustu čidel a senzorů pro kontrolu a monitoring. Elektrolyzéry jsou určeny do dobře ventilovaných a bezpečných prostor.

Obr. 29 - Elektrolyzéry

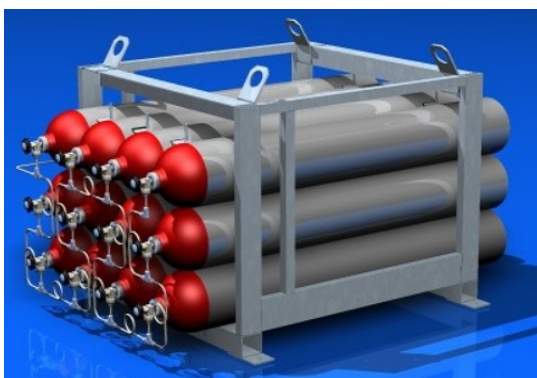
Technické údaje:

Typ	S10	H4m	
Výroba vodíku (při 0°C, 1 bar)	0.265	4	Nm ³ /hr
Spotřeba energie k výrobě vodíku	6.7	7	kWh/Nm ³
Příkon	1.775	28	kW
Spotřeba vody	0.235	3.66	L/hr
Výstupní tlak	13.8	15/30	barg
Čistota	99.9995		%
Vstupní napětí (AC)	205-240 (1f)	380-480 (3f)	V
Kmitočet	50 - 60		Hz

Popis v systému:

Elektrolyzéry budou převádět el. energii na vodík podle logiky jednotlivého systému. V Systému 1 bude připojen elektrolyzér H4m, jelikož z jeho logiky, která bude vysvětlena později, je potřeba vyšší výkon. U Systému 2 budou paralelně zapojeny 3 elektrolyzéry typu S10.

Úložiště vodíku (tlakové láhve)

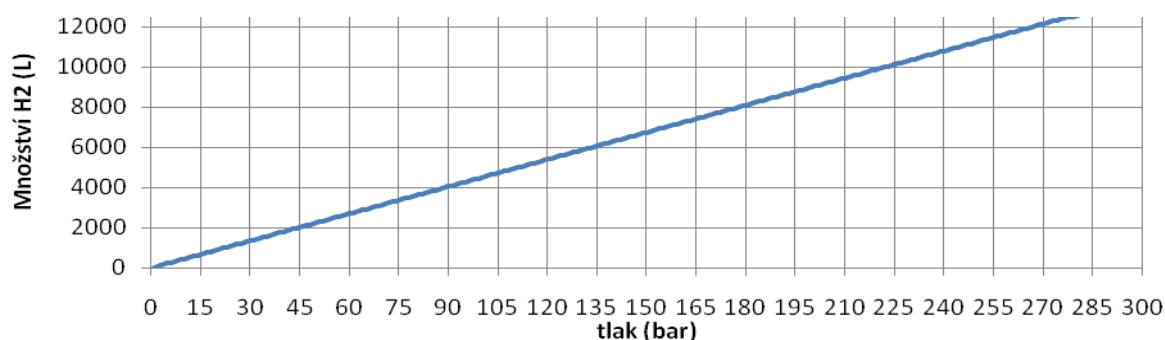


Obr. 30 - Tlakové láhve

Vodík bude ukládán do tlakových láhví (Obr. 30) Tlakové láhve jsem vybral od společnosti Vítkovice Cylinders .

Popis v systému:

Na Obr. 31 je zobrazena závislost množství vodíku, který se do jedné láhve s vodním objemem 50 l vejde, v závislosti na vstupním tlaku.



Obr. 31 - Množství vodíku v tlakové láhvi (50 l)

Pro Systém 1 bude vyrábět vodík elektrolyzér typu H. Tento elektrolyzér je schopen dodávat výstupní tlak 30 bar. Z grafu je tedy možné odečíst, že do jedné láhve se při tlaku 30 bar vejde 1350 l vodíku. Pokud budu uvažovat, že můj systém bude schopen akumulovat 15 000 l vodíku, je počet lahví následující:

$$n = \frac{15\,000}{1\,350} = 12 \quad (1)$$

Pro Systém 2 budou vyrábět vodík 3 paralelně zapojené elektrolyzéry typu S, které budou dodávat vodík o tlaku 13,8 bar. Při stejném množství vodíku vychází počet lahví:

$$n = \frac{15\,000}{630} = 24 \quad (2)$$

Palivový článek



Obr. 33 - Palivový článek

Palivový článek nebo spíše systém palivových článků jsem vybral od společnosti Tropical (Obr. 33). Jedná se o typ TB-5000. V tomto systému je palivový článek od společnosti Ballard typ FCGen 1300 (Obr. 32). Kromě tohoto článku systém obsahuje dotykovou obrazovku, pomocí které lze systém jednoduše nastavit podle potřeb zákazníka. Systém je plně regulovatelný a má široké uplatnění.



Obr. 32 - FCGen 1300

Technické údaje:

Technologie	PEM
Výstupní výkon	5 kW
AC výstup	110 nebo 230 V
Čistota vodíku	99,99 %
Oxidant	vzduch
Chladicí systém	voda
Spotřeba paliva	60 L/min

Popis v systému:

Palivové články jsou v obou systémech stejné. V Systému 1 i Systému 2 jsou paralelně zapojeny 3 palivové články Tropical TB 500. Každý z těchto článků dodává výkon do každé fáze zvlášť. Celkově jsou tedy schopny palivové články dodávat výkon o velikosti 15 kW.

Měniče Victron



Obr. 34 - Měniče Victron

Baterie jsou do systému připojeny přes střídač/nabíječ od společnosti Victron (Obr. 34). V mých systémech jsem použil dva typy měničů/nabíječů:

Pro Systém 1 jsem zvolil Victron Energy Quattro 48V/8000VA/110A-100A/100A. Pro Systém 2 jsem volil typ Victron Energy MultiPlus C 24V/2000VA/50A-30A. Tyto měniče mají čistě sinusové výstupní napětí. Dále jsou vybaveny dvěma AC vstupy a dvěma AC výstupy. Tyto výstupy jsou vybaveny funkcí, která zajistí dodávku energie bez přerušení. Tyto měniče lze zapojovat paralelně pro vyšší požadovaný výkon a stejně tak pro třífázový provoz.

Technické parametry:

Typ	24V/2000 VA	48V/8000	VA
Vstupní DC napětí	19-33	38-66	V
Výstupní AC napětí	230		V
Nabíjecí napětí (absorption) DC	28,8	57,6	V
Nabíjecí napětí (float) DC	27,6	55,2	V
Špičkový výkon	4 000	16 000	W
Výstupní výkon při 25 °C	2 000	8 000	VA
Výstupní výkon při 25 °C	1 600	7 000	W
Výstupní výkon při 40 °C	1 450	6 300	W
Maximální účinnost	93-94	94-96	%

Popis v systému:

V systému bude na každou fázi připojen jeden měnič. Měniče Victron budou do systému dodávat energii z baterií nebo je, v době potřeby, opětovně nabíjet. V Systému 1 budou zapojeny měniče Victron Energy Quattro a v Systému 2 Victron Energy MultiPlus. Z technických parametrů je zřejmé, že při normální teplotě 25 °C je měnič schopen dodávat 1,6 / 8 kW. Celkově by tedy mohly tři měniče do tří fází dodávat výkon 6 kW a 21 kW. Jedná se však jen o maximální hodnotu a v provozu neuvažují s tak velkou hodnotou, a pokud ano, tak jen na krátký okamžik.

Baterie



Obr. 35 - Baterie LiFeYPO₄

Baterie v systému jsem použil typu LiFeYPO₄ (Obr. 35). Baterie jako celek je složena z několika článků podle potřeby velikosti napětí a energie. Tyto baterie prokazují velkou životnost. Oproti ostatním typům baterií se mohou mnohokrát zcela nabít a vybit, dokonce je možné je ponechat částečně vybité po kratší úsek i několik dní bez toho, že by se to projevilo na jejich životnosti. Životnost těchto baterií je 2 000 - 8 000 cyklů. Pokud bychom měli 1 cyklus denně, odpovídala by životnost baterií 22 rokům. Ve skutečnosti bude životnost delší.

Technické údaje:

Typ	LiFeYPO ₄		
Napětí	24	48	V
Počet článků	8	16	
Kapacita článku	200	200	Ah
Energie	5	10	kWh

Popis v systému:

V systémech bude na každý měnič připojena baterie různě. V Systému 1 bude na každou fázi přes měnič Victron připojen jeden bateriový systém o velikosti 10 kWh. Celkově tedy bude v systému uloženo v bateriích 30 kWh energie. V Systému 2 bude na každý měnič připojeno 5 kWh, což dá celkovou energii v bateriovém systému 15 kWh. Tyto baterie jsem volil s jistou rezervou kvůli zlepšení životnosti.

Další komponenty



Obr. 36 - ukázka PLC automatu

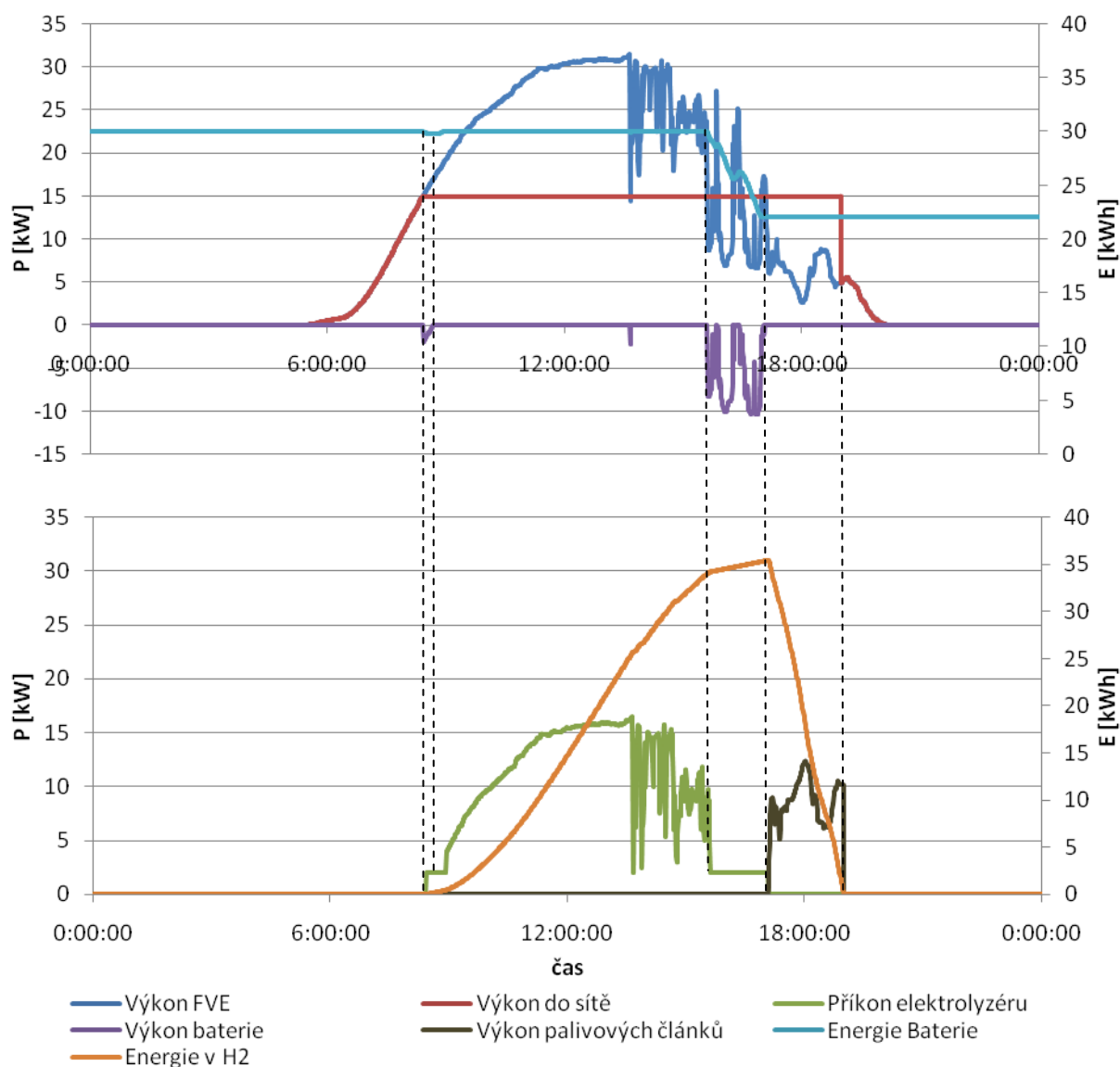
V práci se zabývám pouze základní filozofií obou systémů. Pokud by se systém realizoval, bylo by potřeba ještě mnoho doplňkových komponentů, které by systém ucelily a systém by byl schopen úplného provozu. Jedním z takových věcí je např. PLC automat (Obr. 36), který by prováděl veškeré logické operace a byl by "mozkem" systému. Další zařízení, o kterých by se v mém systému muselo pro jeho úplné sestavení uvažovat, jsou měřicí a jisticí přístroje.

Logiky systémů

Systém, který navrhují, bude regulovat elektrický výkon fotovoltaické elektrárny. Pokud bude výkon dostatečný, část se jej pošle do sítě a část se jej uloží ve formě vodíku. Ten pak bude v pozdějších hodinách znovu použit do palivových článků jako palivo ke znovu výrobě elektřiny a stabilizaci dodávky.

Ve svém návrhu jsem realizoval dvě různá provedení daného systému. Každá z těchto variant má svoje výhody i nevýhody, které se pokusím v následujícím textu objasnit.

System 1



Obr. 37 - Časové průběhy elektrických veličin (System 1)

Systém 1 je nastaven tak, aby do sítě dodával konstantní část výkonu a elektrolyzátor svým příkonem spotřeboval výkon nad 15 kW. Na obrázku je detailní průběh celé logiky systému. Fotovoltaická elektrárna začala kolem 6. hodiny ranní vyrábět elektrickou energii a elektrický výkon na obrázku zobrazen modře. Tato energie roste úměrně s velikostí dopadajícího světla na panely. Systém je vypnutý až do doby, než výkon fotovoltaické elektrárny překročí 15 kW. V tento okamžik se zapne elektrolyzátor, který nechtěný výkon nad 15 kW, zobrazený zeleně, svým příkonem kopíruje a vyrábí vodík. Výkon elektrolyzátoru je 28 kW, což je dostatečné, aby maximální přebytečný výkon (25 kW) dokázal přeměnit na vodík. Vodík o tlaku 30 barů putuje do vysokotlakých lahví, kde čeká na svoje pozdější uplatnění. Ve večerních hodinách, kdy výkon fotovoltaické elektrárny už nedosahuje takové úrovně, se zapnou palivové články, které spotřebovávají uložený vodík. Palivové články pak podle výkonu elektrárny regulují svůj el. výkon tak, aby nepřekročil nastavených 15 kW. Jejich výkon je zobrazen černě. Celkový výkon jdoucí do sítě je zobrazen červeně.

Celková energie spotřebovaná elektrolyzátozem se nikdy nepřenesla celá do vodíku a pak zpět na elektřinu pomocí palivových článků. Účinnosti systému je nízká (19,8 %) , výsledná vyrobená energie z palivových článků bude velmi malá. Elektrolyzátoru však rovněž velké výkonové změny velice vadí a mají velký dopad na jeho životnost. V systému jsou proto zabudované baterie, které po zapnutí elektrolyzátoru nedopustí jeho vypnutí a jeho minimální příkon bude 2 kW. Kromě příkonu do elektrolyzátoru, baterie rovněž dodávají část výkonu do sítě, aby se docílilo konstantního průběhu. Výkony, které baterie musí dodat, jsou zobrazeny fialově. Baterie jsou také nastaveny tak, aby se při ztrátě energie nabíjely z přebytku el. energie, avšak byly by regulované tak, aby vždy zbyly 2 kW pro min. příkon elektrolyzátoru. Energie baterií je zobrazena světle modře. Ekvivalentní množství energie ve vodíku je zobrazeno oranžově.

Průběh dne (Obr. 37) je následující. V 5:29 začíná elektrárna dodávat výkon. Tento výkon pomalu roste až do 8:24, kdy se zapne elektrolyzátor. Ve stejný okamžik se zapnou měniče Victron a z baterií dodávají minimální výkon 2 kW. Jak výkon elektrárny pomalu roste, je stále potřeba menšího výkonu od baterií k udržení 2 kW. V 8:39 dosahuje přebytek 2 kW a začíná tak nabíjení baterií. Jakmile jsou baterie nabity, dojde k nepatrnému skoku na příkonu elektrolyzátoru. Ten pak kopíruje přebytek až do 13:39, kdy na okamžik klesl výkon elektrárny pod 15 kW a tak opět chybějící výkon byl hrazen z baterií. Chybějícím výkonem myslím pochopitelně výkon nutný k dodání 2 kW do elektrolyzátoru a zbývajících do konstantních 15 kW. Jakmile se výkon fotovoltaické elektrárny obnovil, baterie zahájily nabíjení, avšak regulované tak, aby zase v přebytku zbyly 2 kW pro minimální příkon elektrolyzátoru. V 15:35 nastal podobný problém, ale v mnohem větším měřítku. Systém však reagoval úplně stejně a elektrolyzátor tak mohl fungovat až do 17:03, kdy už fotovoltaická elektrárna přestala dodávat dostatečný výkon a s vypnutím elektrolyzátoru a baterií se zapnuly palivové články. Ty svým výstupním výkonem, jak už bylo popsáno předtím, kopírovaly zbytek vyrábějí elektrické energie pro konstantní výstupní výkon do sítě 15 kW až do 18:58. Energie baterie není však ke konci plně nabita, a proto bude další den pravděpodobně delší dobu elektrolyzátor odebírat jen 2 kW, než se baterie nabijí naplno. Průběh tří po sobě jdoucích dnů je uveden v příloze A.

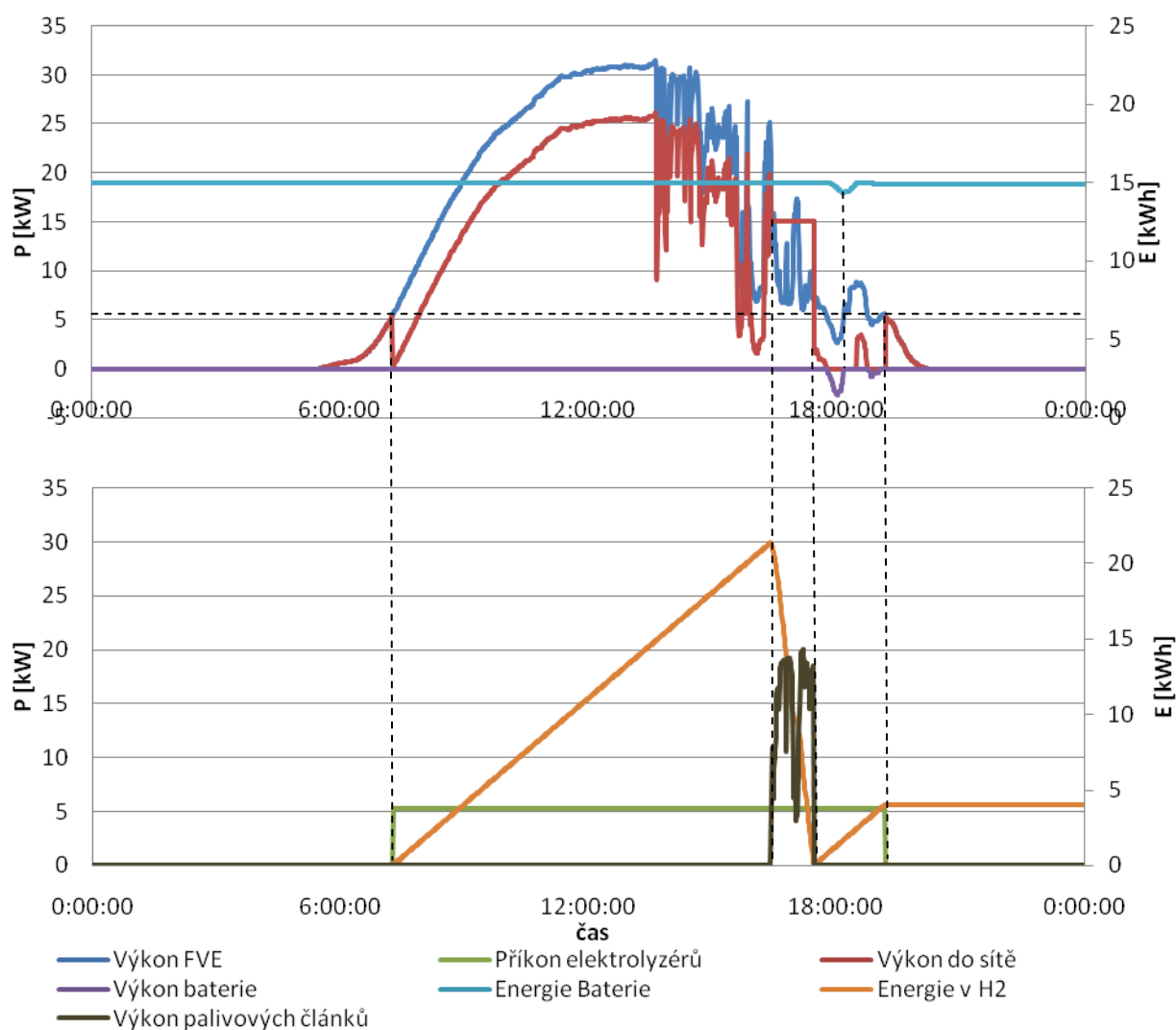
Výhody:

- Konstantní výstupní výkon do sítě
- Menší výkonové nárazy způsobené systémem

Nevýhody:

- Obtížná regulace
- Nestálý chod elektrolyzáru
- Častější chod baterií
- Vyšší výkon baterií i elektrolyzáru
- Vyšší cena

System 2



Obr. 38 - Časové průběhy elektrických veličin (System 2)

Systém druhého typu je v jistém smyslu podobný tomu předchozímu, avšak s jistými změnami. U Systému 2 jsou voleny tři elektrolyzéry s menšími výkony (každý o 1,775 kW). Ty po zapnutí odebírají ze systému stálý výkon. Větší část výkonu vyráběného elektrárnou jde do sítě. Baterie v Systému 2 jsou nastaveny tak, že doplňují jen chybějící výkony elektrolyzérů pro jejich konstantní příkon a nemají žádný vliv na síť. Proto ani není potřeba tak velká kapacita a i výkony měničů jsou navrženy a nastaveny jen na výkony elektrolyzérů. Ve večerních hodinách, kdy fotovoltaická elektrárna nemá dostatečný výkon, se opět zapnou palivové články, avšak ty u tohoto systému mohou běžet současně s elektrolyzéry. To je kvůli tomu, aby výkon byl alespoň trochu plynulý a nevznikl v síti velký výkonový náraz po jejich zapnutí. Nevýhodou je fakt, že do sítě jde velmi kolísavý výkon daný fotovoltaickou elektrárnou. Výhodou je však to, že elektrolyzéry mají konstantní příkon, což má velice dobré účinky na jejich životnost. Kromě toho je systém také levnější z hlediska realizace řídicího systému. Na Obr. 38 je potom zobrazen průběh stejného dne jako v Systému 1, tedy 2.6.2013, jen je zpracován logikou Systému 2.

Průběh tohoto dne je následující. Stejně jako minule, začíná fotovoltaická elektrárna v 5:29 vyrábět elektrickou energii. V 7:15 je však její výkon pro elektrolyzéry dostatečný a tak je logika zapne. Jejich příkon je zobrazen zeleně a ekvivalentní množství energie ve vodíku oranžově. V síti díky tomu vznikl jistý ráz skrze poklesu dodávaného výkonu. Elektrárna pak dále zvyšuje svůj výkon a jeho průběh je dán velikostí slunečního záření dopadajícího na elektrárnu. Proces trval až do 16:24, kdy výkon, který jde do sítě, již není dostatečný a zapínají se palivové články pro udržení konstantního výkonu 15 kW. Tyto články regulují svůj výkon tak, aby bylo vždy v síti 15 kW. Na Obr. 38 je také vidět, jak prudce se zvýšila spotřeba vodíku, respektive jeho ekvivalentní energie, v něm uložené. Účinnost celého systému je 20,7 %. Díky tomu palivové články rychle spotřebovaly uložený vodík, i když elektrolyzéry stále vyráběly. Systém by byl nastaven tak, že by se palivové články vypnuly (v čase 17:26) a vodík, který se vyrábí elektrolyzéry dále, by se použil do dalšího dne. Důvod, proč by takto systém fungoval, by bylo to, aby nedocházelo k dodávce výkonu 15 kW na několik minut, než se vodík zase spotřebuje. Takovýto nestálý chod by velmi škodil palivovým článkům i síti. Další změna nastala až v 17:47, kdy její výkon klesl pod limitní mez, kdy elektrolyzéry by musely snížit svůj výkon. V tento okamžik naběhnou měniče Victron a z baterií posílají dodatečný výkon pro zachování konstantních příkonů elektrolyzérů. Nakonec v 19:10 se vypínají i elektrolyzéry . Ke konci dne bylo třeba napájet elektrolyzéry a přebytek nebyl dostatečný pro opětovné nabíjení baterií, proto, stejně jako u Systému 1, i zde jdou baterie do dalšího dne ne zcela nabitě. V příloze B je graf ukazující systém v provozu tří po sobě jdoucích dnů.

Výhody:

- Menší výkon elektrolyzérů a baterií
- Stálý výkon elektrolyzérů
- Jednodušší regulace

Nevýhody:

- Výkonové nárazy způsobené systémem
- Skoro nulová regulace kolísavého výkonu do sítě

Parametry systémů

Účinnost systémů

Účinnost elektrolyzérů

Z katalogových hodnot lze určit účinnosti jednotlivých elektrolyzérů. Elektrolyzér H4m v Systému 1 má spotřebu 7 kWh/Nm³ (vyrobeného vodíku). Pokud budu brát jako referenční den 3.6., který je popsán a jehož graf je o kapitole výše, tak zjistím, že elektrolyzér musí spotřebovat 84,301 kWh.

Množství vodíku:

$$V_{H_2} = \frac{84,301}{7} = 12,043 \text{ Nm}^3 \rightarrow 12043 \text{ l} \quad (3)$$

Energie ve vyrobených 12043 litrech vodíku:

$$E_{H_2} = \frac{V_{H_2}}{V_{molH_2}} \cdot Q_t \cdot U_{ROV} = \frac{12043}{22,414} \cdot 53,596 \cdot 1,23 = 35,42 \text{ kWh} \quad (4)$$

Účinnost elektrolyzérů H4m je tedy:

$$\eta_{el} = \frac{E_{H_2}}{E_{spot}} \cdot 100 = \frac{35,42}{84,301} \cdot 100 = 42 \% \quad (5)$$

Podobně pro elektrolyzér S10 v Systému 2. Zde musí 3 paralelně zapojené elektrolyzéry spotřebovat 63,474 kWh. Jeden elektrolyzér tedy 21,158 kWh. Elektrolyzér S10 má spotřebu 6,7 kWh/Nm³ (vyrobeného vodíku).

Množství vodíku:

$$V_{H_2} = \frac{21,158}{6,7} = 3,157917 \text{ Nm}^3 \rightarrow 3157,919 \text{ l} \quad (6)$$

Energie ve vyrobeném 3157,919 litrech vodíku:

$$E_{H_2} = \frac{V_{H_2}}{V_{molH_2}} \cdot Q_t \cdot U_{ROV} = \frac{3157,919}{22,414} \cdot 53,596 \cdot 1,23 = 9,288 \text{ kWh} \quad (7)$$

Účinnost elektrolyzérů S10 je tedy:

$$\eta_{el2} = \frac{E_{H_2}}{E_{spot}} \cdot 100 = \frac{9,288}{21,15804} \cdot 100 = 43,9 \% \quad (8)$$

Z vypočítaných hodnot vychází, že elektrolyzér typu S10 má lepší účinnost než typ H4m.

Účinnost palivových článků

Při zjištění účinnosti palivových článků poslouží podobné vzorce jako v případě elektrolyzérů.

Palivový článek nebo spíše systém Tropical TB 5000, má spotřebu vodíku 60 l/min a výkon 5 kW.

Za hodinu tedy spotřebuje:

$$60 \cdot 60 = 3600 \text{ l/h} \quad (9)$$

a 5 kWh el. energie.

V tlakových lahvích je uloženo 11548,08 l vodíku. Toto množství se spotřebuje za:

$$\frac{11\,548,08}{3600} = 3,21 \text{ h} \quad (10)$$

Energie vyrobená palivovým článkem je:

$$E_{pal} = 3,21 \cdot 5 = 16,039 \text{ kWh} \quad (11)$$

Energie ve vyrobených 11 548,08 litrech vodíku:

$$E_{H_2} = \frac{V_{H_2}}{V_{molH_2}} \cdot Q_t \cdot U_{ROV} = \frac{11548,08}{22,414} \cdot 53,596 \cdot 1,23 = 33,96472 \text{ kWh} \quad (12)$$

Účinnost palivového článku Tropical TB 5000 je tedy:

$$\eta_{pal} = \frac{E_{H_2}}{E_{spot}} \cdot 100 = \frac{16,039}{33,96472} \cdot 100 = 47,22 \% \quad (13)$$

Celková účinnost přeměny

Celkovou účinnost přeměny získám vynásobením účinnosti elektrolyzérů a palivových článků.

Pro Systém 1:

$$\eta_{sys1} = \eta_{el1} \cdot \eta_{pal} \cdot 100 = 0,42 \cdot 0,4722 \cdot 100 = \mathbf{19,8 \%} \quad (14)$$

Pro Systém 2:

$$\eta_{sys2} = \eta_{el2} \cdot \eta_{pal} \cdot 100 = 0,439 \cdot 0,4722 \cdot 100 = \mathbf{20,7 \%} \quad (15)$$

Provoz systému

Jak už bylo řečeno vstupní hodnoty byly měřeny za velmi dobrých podmínek. Celé měření probíhalo v letních měsících, kdy výkon elektrárny byl až 200 % ze svého denního průměru. V zimních měsících je výkon fotovoltaické elektrárny naopak velmi nízký a dosahuje průměrně 20 % svého průměru. V České republice průměrně vyrobí fotovoltaická elektrárna o instalovaném výkonu 40 kWp 38 000 - 44 000 kWh ročně. To je 104 - 121 kWh za den. Při výpočtu jsem uvažoval, že elektrárna první rok vyrobí 41 245 kWh. Druhý rok je snížen kvůli degradaci o 0,08 % tedy 40 915,04 kWh atd. Při výpočtu jsem vycházel z toho, že poměr celkově vyrobené elektrické energie a elektrické energie vyrobené palivovými články, je necelých 7 % u Systému 1 a 6 % u Systému 2.

Elektrolyzéry v Systému 2 byly průměrně za měřená období v provozu 12 h/den. U Systému 1 to bylo 8 h/den. V České republice je průměrná doba slunečního svitu 1462 h/rok. [18] Termín sluneční svit vyjadřuje dobu, kdy přímé sluneční záření dosahovalo zemského povrchu.[19] S touto dobou budu uvažovat i pro provoz elektrolyzérů v Systému 1. Jeho provoz tedy bude **4 h/den**. V České republice je délka denního svitu všech dní v roce od východu k západu Slunce cca. 4500 h/rok, což činí 51 % z celého roku.[20] Pokud od této hodnoty odečtu hodiny slunečního svitu, dostanu počet hodin v roce, kdy elektrárna vyrábí i za špatných slunečních podmínek.

$$4500 - 1462 = 3038 \text{ h/rok} \quad (16)$$

Pro odhad provozních hodin dále uvažuji s 50 % těchto hodin (než výkon vystoupá k dostatečné hladině elektrolyzérů v Systému 2) a přičtu k nim hodiny slunečního svitu. Tak získám počet 2981 h/rok. To je doba, kdy by teoreticky měly fungovat elektrolyzéry v Systému 2 (**8 h/den**).

$$\frac{3038}{2} + 1462 = 2981 \frac{\text{h}}{\text{rok}} \rightarrow \mathbf{8 \text{ h/den}} \quad (17)$$

Pro určení palivových článků si nejdříve spočítám průměrnou energii vyrobenou elektrolyzéry. U Systému 1 uvažuji průměrný příkon elektrolyzérů za měřené období 8,333 kW, tedy třetinový vůči maximální hodnotě, které může dosáhnout (25 kW) . Při průměrné době provozu (4 h) vyrobí 33,333 kWh. Při vynásobení této energie účinností Systému 1 získám 6,6 kWh pro palivové články. Průměrný výkon palivových článků budu odhadovat na poloviční, tedy 7,5 kW. Průměrný roční provoz palivového článku v Systému 1 tedy bude

$$\frac{6,6}{7,5} = \mathbf{0,88 \text{ h/den}} \quad (18)$$

Podobně u Systému 2, kde příkon elektrolyzérů je 5,3 kW a provoz je 8 h/den. Elektrolyzéry tedy vyrobí 42,6 kWh. Po vynásobení účinností získám 8,81 kWh. Výkon palivových článků bude stejný, takže provoz bude:

$$\frac{8,81}{7,5} = \mathbf{1,17 \text{ h/den}} \quad (19)$$

Životnost systémů

Určení životnosti vodíkového systému není jednoduchá záležitost. U jednotlivých komponentů je jejich životnost udávána pouze orientačně a při dodržování jistých provozních parametrů. Například baterie LiFeYPO_4 mají, dle katalogů, životnost minimálně 2000 cyklů. Pokud se však nebudou přetěžovat a nabíjejí a vybíjejí se v bezpečném intervalu napětí, tak se jejich životnost zvýší na 8000 cyklů. Pokud budu dále uvažovat jeden cyklus nabití a vybití na den, dostávám tak rozpětí od 48 000 - 192 000 hodin. Na tomto příkladě je vidět, jak velmi záleží na provozu.

U vodíkových systémů, jako jsou palivové články a elektrolyzéry, je tomu podobně. U těchto komponentů je kritickým místem membrána PEM. Tyto membrány mají odhadovanou životnost jen 15 000 hodin a jsou velice závislé na teplotě, vlhkosti apod. Membrány se však dají po skončení jejich životnosti vyměnit. S jejich výměnou počítám i dále v provozních nákladech.

Životnost vodíkových technologií

V Systému 1 je denní provoz elektrolyzérů zhruba nějakých 4 h/den. Provozní hodiny ročně tedy budou:

$$4 \cdot 365 = 1460 \text{ h/rok} \quad (20)$$

To při životnosti membrán dává:

$$\frac{15\,000}{1460} = 10 \rightarrow 10 \text{ let} \quad (21)$$

Při tomto provozu je teoretická životnost elektrolyzérů 10 let. Po 10 letech je vhodná výměna membrán. Podobný výpočet provedu u ostatních zařízení. V tabulce 6 jsou zobrazeny teoretické životnosti vodíkových technologií.

Tabulka 6 - Životnost vodíkových technologií

	Systém 1	Systém 2
Provoz elektrolyzérů [h/den]	4	8
Životnost elektrolyzérů [rok]	10	5
Provoz palivových článků [h/den]	0,88	1,17
Životnost palivových článků [rok]	46	35

Palivové články mají velmi nízké provozní hodiny. Díky průměrné účinnosti, vypočítané v předešlé kapitole, se jejich provoz odhaduje na pár hodin denně. Méně častý provoz ale nahrává jejich životnosti.

Bezpečnost systémů

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, vodík tvoří výbušnou směs s kyslíkem a se vzduchem v širokém koncentračním rozmezí. Tato mez je 4-95 % objemu vodíku v kyslíku a 4-77 % vodíku ve vzduchu. Ve vzduchu je tedy lehce zápalný, a proto jakýkoliv zdroj, jako je jiskra, cigareta elektrostatický výboj, může způsobit výbuch směsi. Provoz vodíkových systémů bude podmíněn jistým bezpečnostním předpisům.

V mých systémech je nejnebezpečnějším místem rozvod vodíku z elektrolyzéru do tlakových lahví a z nich do palivových článků. Tento rozvod musí být velmi těsný a zabezpečený tak, aby nedošlo k netěsnostem a vzniku výbušné směsi. Vodík je 14,4 krát lehčí než vzduch. Při vzniku netěsnosti putuje ke stropním prostorům, kde vzniká nebezpečná koncentrace. Místnosti, kde bude systém vybudován, by měly mít detektory hořlavých plynů a stropní větrání. Jeden z detektorů hořlavých plynů je na Obr. 39. Strop místnosti se dá také upravit tak, aby byl zkosený pod jistým úhlem. Díky tomu bude vodík putovat do vyššího místa, tedy místa, o kterém je dopředu známo a do kterého se umístí větrání a detekční přístroje. Podobnou ochranou pojistku má i laboratoř vodíkových technologií VŠB v ulici Krásnopolská.



Obr. 39 - Detektor hořlavých plynů GS - 130

Samotné tlakové láhve musí mít také svoje podmínky skladování a provozu. Se zvyšující se teplotou roste tlak v láhvi. Láhve by tedy měly být skladované tak, aby jejich teplota nepřekročila 50 °C. [2] Tlakové láhve jsou však ve většině případů dimenzovány na větší tlaky, problémem je však rozvod a odběrový systém, který v mém případě ústí do palivových článků. S větším tlakem, než je provozní, hrozí poškození rozvodů, ventilů, regulátorů a i samotných palivových článků. Láhve musí být rovněž zajištěny před možným pádem a poškozením.

Jedním z dalších věcí, na které je při manipulaci s vodíkem dobré pamatovat, je fakt, že má záporný Joule-Thomsonův koeficient. To znamená, že se zahřívá při uvolnění tlaku. Pokud tedy dojde k prasklině ve tlakových lahvích a náhlé expanzi může, dojít k jeho samovolnému vznícení.

Pokud by došlo k úniku a detektor by zjistil přítomnost vodíku ve vzduchu, musí logika okamžitě vypnout všechny elektrické zařízení v místnosti. Systémy by měly být tedy vybudovány tak, aby při poruše byly schopny se vypnout, a přitom výroba fotovoltaické elektrárny a její dodávka do sítě nebyla přerušena.

Technicko - ekonomická analýza vodíkového akumulčního systému

V další části své práce se budu zabývat technicko - ekonomickou analýzou. Mé vodíkové systémy jsou pouze jen teoretické, proto tato analýza bude hlavně informačního charakteru. Cílem bude dát představu, kolik podobný systém a jeho vybudování budou stát. Dnešní odhady na vodíkové technologie a elektrolytické stanice se pohybují kolem 10 tisíc euro za kW (274 000 Kč za kW). [14]

Investiční náklady:

V rámci technicko-ekonomické analýzy bylo potřeba zjistit především investiční náklady jednotlivých systémů. V tabulce je uveden soupis komponentů a jejich cena. Některé ceny byly brány jen jako přibližné, jelikož při nákupu některých komponentů hraje velkou roli kurz české koruny, přeprava a další faktory, které by se musely při detailní analýze zohlednit. Mým cílem je však pouze přiblížit investiční odhad.

Systém 1:

1x Elektrolyzátor H4m.....	2 000 000	Kč
3x Palivový článek Tropical TB 5000.....	1 000 000	Kč
3x Měníč/Nabíječ Vicron Energy Quattro.....	387 000	Kč
3x Baterie LiFeYPO4 24V 5kWh 8x3,2Vx200Ah.....	363 000	Kč
12x Tlakové láhve.....	7 000	Kč
Ostatní komponenty.....	500 000	Kč
Celkové investiční náklady Systému 1	4 257 000	Kč

Systém 2:

3x Elektrolýzér S10	500 000	Kč
3x Palivový člunek Tropical TB 500	1 000 000	Kč
3x Měníč/Nabíječ Victron Energy MultiPlus	112 200	Kč
3x Baterie LiFeYPO4 24V 5kWh 8x3.2Vx200Ah	185 000	Kč
24x Tlakové láhve	13 000	Kč
Ostatní komponenty	500 000	Kč
Celkové investiční náklady Systému 2	2 310 200	Kč
Rozdíl	1 946 800	Kč

Provozní náklady

Provozní náklady vodíkového systému je obtížné určit. Nejslabším místem v systému jsou, jak už bylo řečeno, membrány v elektrolýzérů a palivových čluncích. Výměna takovýchto membrán však není jednoduchá a levná záležitost. Vše se odvíjí od dodavatele této technologie a jeho přístupu k této problematice. Jelikož membrány jsou hlavní částí vodíkových zařízení a z jistých odborných odhadů můžu říct, že cena výměny membrán se bude pohybovat okolo 75 % investičních nákladů na zařízení. Pokud například elektrolýzér má odhadovanou cenu 2 000 000 Kč, tak výměna membrán bude stát 1 500 000 Kč. Takováto výměna bude u elektrolýzérů v Systému 1 prováděna každých 10 let. V tabulce 7 je soupis nákladů na opravu jednotlivých membrán i doby, kdy se musejí vyměnit.

Tabulka 7 - Provozní náklady

	Investiční náklady	
	Elektrolýzér	Palivový člunek
Systém 1	2 000 000 Kč	1 000 000 Kč
Systém 2	500 000 Kč	1 000 000 Kč
Náklady na membrány		
Systém 1	1 500 000 Kč	750 000 Kč
Systém 2	375 000 Kč	750 000 Kč
Doba výměny membrán		
Systém 1	10	46
Systém 2	5	35

Z tabulky 7 se dají spočítat i roční provozní náklady. Pro Systém 1 jsou 166 304,35 Kč/rok, a pro Systém 2 96 428,57 Kč/rok.

Podpora vodíkového systému

Jak je vidět z investičních nákladů, je vodíkový systém poněkud drahý a pro obvyčejného uživatele nevýhodný. V této části kapitoly se pokusím navrhnout, jak by takovýto systém mohl být v budoucnu podporován, aby se mohl stát realizovatelný.

V dalších porovnáních budu uvažovat:

- Investiční cena elektrárny a střídače Fronius je 17 mil. Kč
- Střídač Fronius bude majitel co 10 let měnit z důvodu údržby

Tyto investiční a provozní náklady bude muset majitel zaplatit i bez vodíkových systémů, avšak určení těchto nákladů mi pomůže ke zjištění celkové výnosnosti elektrárny na konci 25. roku. S tímto výnosem na konci budu porovnávat výnosy elektrárny s připojeným akumulacním systémem a hledat vhodnou dotaci.

Jako první je dobré se seznámit s cenami prodané kWh za výrobu z fotovoltaických panelů. To mi dá jasnou představu o tom, kolik provozovatel vydělá bez provozu vodíkového systému. V tabulce 8 jsou zobrazeny ceny, které stanovil Energetický regulační úřad pro rok 2014. Tyto ceny se však každým rokem mění a ERÚ je zobrazuje ve svém věstníku. V tabulce 9 jsou potom zobrazeny výkupní ceny pro rok 2010.

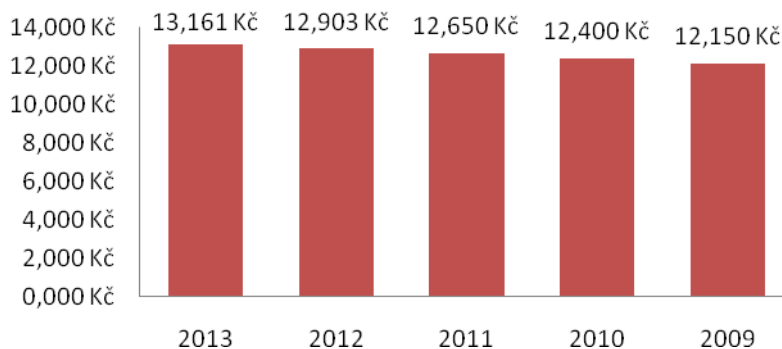
Tabulka 8 - Výkupní ceny pro rok 2014

ř./sl.	Druh podporovaného zdroje (výrobný)	Datum uvedení výroby do provozu		Instalovaný výkon výrobný [kW]		Jednotarifní pásmo provozování	
		od (včetně)	do (včetně)	od	do (včetně)	Výkupní ceny [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]
	a	b	c	d	e	l	m
500	Výroba elektřiny využitím slunečního záření	-	31.12.2005	-	-	7 418	6 688
501		1.1.2006	31.12.2007	-	-	15 565	14 835
502		1.1.2008	31.12.2008	-	-	15 180	14 450
503		1.1.2009	31.12.2009	0	30	14 243	13 643
504		1.1.2009	31.12.2009	30	-	14 139	13 409
505		1.1.2010	31.12.2010	0	30	13 265	12 665
506		1.1.2010	31.12.2010	30	-	13 161	12 431
507		1.1.2011	31.12.2011	0	30	7 959	7 359
508		1.1.2011	31.12.2011	30	100	6 264	5 534
509		1.1.2011	31.12.2011	100	-	5 837	5 107
510		1.1.2012	31.12.2012	0	30	6 410	5 810
511		1.1.2013	30.6.2013	0	5	3 478	2 878
512		1.1.2013	30.6.2013	5	30	2 887	2 287
513		1.7.2013	31.12.2013	0	5	3 050	2 450
514		1.7.2013	31.12.2013	5	30	2 479	1 879

Tabulka 9-Výkupní ceny pro 2010

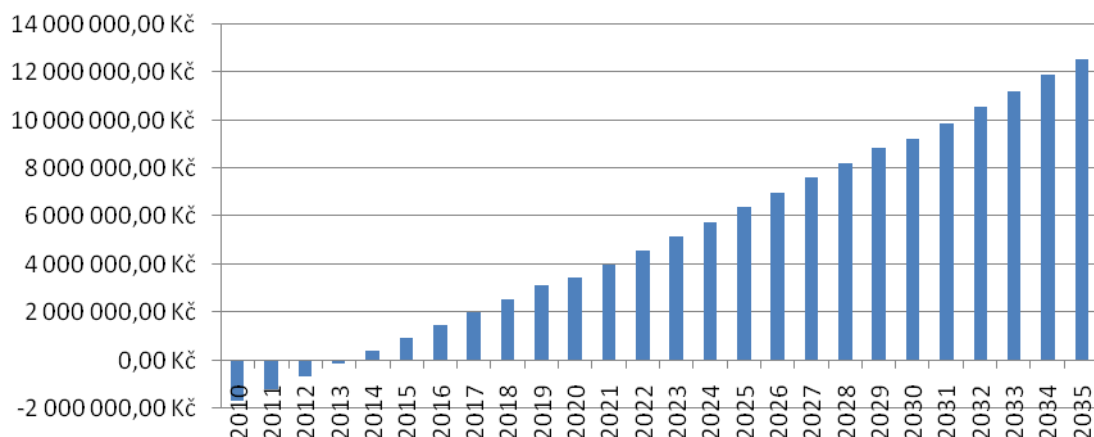
Datum uvedení do provozu	Výkupní ceny elektřiny dodané do sítě v Kč/MWh	Zelené bonusy v Kč/MWh
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem do 30 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. ledna 2011 do 31. prosince 2011	7500	6500
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem nad 30 kW do 100 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. ledna 2011 do 31. prosince 2011	5900	4900
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem nad 100 kW a uvedeným do provozu od 1. ledna 2011 do 31. prosince 2011	5500	4500
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem do 30 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. ledna 2010 do 31. prosince 2010	12500	11500
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem nad 30 kW a uvedeným do provozu od 1. ledna 2010 do 31. prosince 2010	12400	11400
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem do 30 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. ledna 2009 do 31. prosince 2009	13420	12420
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem nad 30 kW a uvedeným do provozu od 1. ledna 2009 do 31. prosince 2009	13320	12320
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj uvedený do provozu od 1. ledna 2008 do 31. prosince 2008	14300	13300
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj uvedený do provozu od 1. ledna 2006 do 31. prosince 2007	14660	13660
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj uvedený do provozu před 1. lednem 2006	6990	5990

Z archivů Věstníků se dá zjistit, že ceny za vyrobenou kWh fotovoltaické elektrárny rostou každým rokem o 2 %. Na Obr. 40 je graf zobrazující trend růstu ceny fotovoltaické elektrárny postavené v době 1.1.2010 - 31.12.2010 pro výkon nad 30 kW. Rok 2009 je v grafu obsažen taky, jelikož Věstník vychází kolem listopadu a uvažuje elektrárny postavené do nadcházejícího roku. To se však v roce 2014 změnilo. Elektrárny postavené po 31.12.2013 už nedostávají podle věstníku žádné dotace.



Obr. 40- Trend růstu ceny pro elektrárnu 2010

Fotovoltaická elektrárna použitá pro můj návrh byla postavena v roce 2010 a má záruku 25 let. V roce 2035 by skončila její záruka a při stálém trendu zvyšování cen za vyrobenou el. energii o 2 % a roční degradaci výroby o 0,8 % by vydělala celkově 12 555 214,82 Kč. Na Obr. 41 je její cenový průběh. Do výpočtu je i zahrnuta výměna střídače Fronius po uplynutí životnosti každých 10 let.

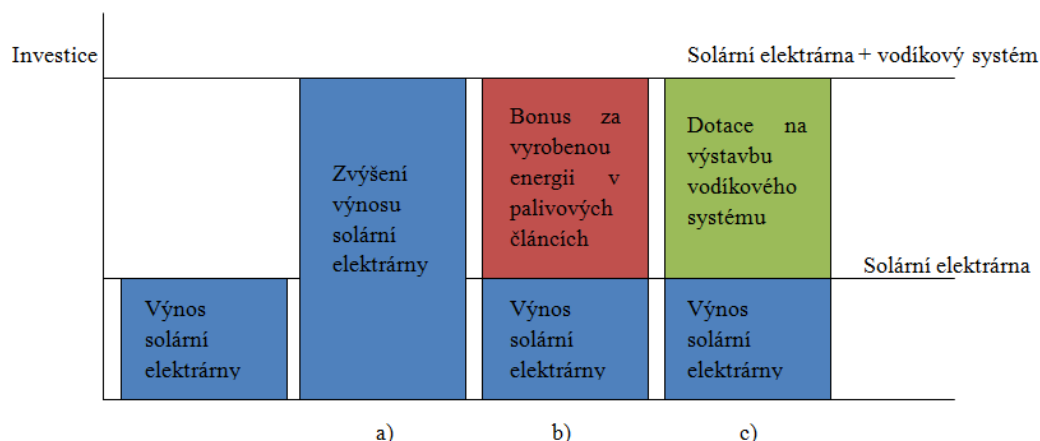


Obr. 41 - Výnosnost fotovoltaické elektrárny

Z grafu je také vidět že by se elektrárna splácela 4 roky a dalších 21 by vykazovala zisk. Aby byl vodíkový systém pro obvyčejného vlastníka výhodný, nesmí v roce 2035 vydělat i při investici do vodíkového systému méně než bez něj. S takovouto úvahou jsem postupoval dále.

Pokud by vlastník postavil vodíkový systém v roce 2010 (společně s fotovoltaickou elektrárnou), musel by v roce 2035 dosáhnout stejné částky jako v odstavci nahoře, tedy 12 555 214 Kč, aby se mu systém vyplatil a nebyl pro něho ztrátou. Vodíkové akumulční systémy mají investiční náklady 4 257 000 Kč pro Systém 1 a 2 310 200 Kč pro Systém 2. Principiálně jde o zaplacení těchto investičních částek do roku 2035 + provozních nákladů, které jsem spočítal v předchozí kapitole. Toho lze docílit několika způsoby (Obr. 42):

- a) zvýšení bonusu za vyrobenou energii fotovoltaickou elektrárnou** (např. z 13,161 Kč na 18,05 Kč)
- b) přidání bonusu za vyrobenou energii palivovými články** (13,161 Kč za vyrobenou kWh z fotovoltaické elektrárny + 101,723 Kč za kWh vyrobenou v palivových článcích)
- c) získání dotace na vodíkový systém** (Zaplacení vodíkového systému státem/distributorem...apod.)
- d) kombinací třech předchozích**



Obr. 42 - Způsoby dotace

Při výpočtech minimální dotace na vodíkový akumulací systém jsem přibral v úvahu kromě provozních nákladů také růst ceny za dodanou energii 2 % ročně. Podobně jak je tomu při dotacích na fotovoltaické elektrárny.

V tabulce 10 je návrh dotací pro dva různé případy. První úvaha spočívá v tom, že majitel postavil vodíkový systém společně s fotovoltaickou elektrárnou v roce 2010. Druhá úvaha je v tom, že majitel již postavenou fotovoltaickou elektrárnu má a vodíkový systém postaví v roce 2015.

Tabulka 10 - Dotace na vodíkový systém

	Kč/kWh	
	Systém 1	Systém 2
Elektrárna i vodíkový systém postavený v roce 2010		
Zvýšení bonusu za energii vyrobenou el. energií	18,05	15,158
Bonus za energii vyrobenou v palivových článcích	83,185	40,589
50 % investiční dotace + Zvýšení bonusu za vyrobenou el. energii	16,264	14,189
50 % investiční dotace + Bonus za energii vyrobenou v pal. článcích	56,881	26,315
Elektrárna postavená v roce 2010 + Vodíkový systém postavený v roce 2015		
Zvýšení bonusu za energii vyrobenou el. energií	20,186	19,486
Bonus za energii vyrobenou v palivových článcích	95,637	85,326
50 % investiční dotace + Zvýšení bonusu za vyrobenou el. energii	19,704	18,186
50 % investiční dotace + Bonus za energii vyrobenou v pal. článcích	88,531	66,172

Z tabulky 10 je vidět, že nejlepší variantou je zvýšení bonusu za vyrobenou elektřinu fotovoltaickou elektrárnou s vodíkovým systémem. Nejlépe by bylo, kdyby distributor nebo stát dotoval také výstavbu podobného systému.

Celá dotace by mohla fungovat takto:

Majitel se rozhodne na svoji elektrárnu postavenou v roce 2010 postavit vodíkový systém 2. V roce 2015 by ho zprovoznil a stát by mu přidal na výkupní ceně (v roce 2015 teoreticky 13,693 při růstu 2 % ročně) za fotovoltaickou elektrárnu vybavenou vodíkovým systémem - 7 Kč (20,693Kč). Díky tomu by se v roce 2035 nejen jeho systém splatil, ale ještě by navíc vydělal 447 737,64 Kč oproti tomu, kdyby systém neměl.

V přílohách C,D,E,F jsou grafy a výpočetní tabulky pro Systém 1, které mi k výpočtu pomohly.

Závěr

Vodík a vodíkové technologie mají v sobě ukrytý velký potenciál. Bohužel tento potenciál má v sobě již dlouhou dobu a stále je jen pouze palivem budoucnosti. Jako každá nová technologie a hlavně ta, která zasahuje do dvou nejdůležitějších tržních záležitostí, jako je autodoprava a energetika, čelí mnoha problémům a nevolí do tak zaběhnutého hospodářství přidat něco nového. Vodík má ale ve světě spoustu přívrženců, díky nimž jeho výzkum technologie a implementace postupuje dále. Jak je v mé práci zmíněno, existuje mnoho vodíkových prototypů a projektů, jak už z pohledu dopravy tak energetiky, které svými výstupy dávají ukázkou toho, jak by mohl být vodík v příštích století užitečný. Výroba vodíkových technologií je stále však na dnešní poměry drahá. To je způsobeno drahými kovy, které ke svému provozu potřebuje. Jestli se časem najde jiný způsob výroby nebo těžba těchto kovů bude levnější, je otázka budoucnosti. Pokud se časem najde východisko, mohl by vodík způsobit podobný boom jako fotovoltaické elektrárny.

Ve své práci jsem provedl návrh vodíkového akumulčního systému. Pro návrh systémů byly použité komponenty k běžnému dostání na internetu. V dnešní době, ale pokud by šlo o složitější systémy nebo systém o mnohem větším výkonu, lze přes dodavatelské firmy řešit konkrétní provozní parametry komponentů, aby systém fungoval podle potřeby. Toto je otázka hlavně vodíkových technologií, které by se daly navrhnout mnohem přesněji a také účinněji. Vodíkové komponenty použité jsou pro obecný provoz a obsahují i některé části, které jsou zbytečně předimenzovány, jako čistota vodíku a pod. Pokud by trh někdy obsahoval dostatečnou možnost výběru, byl by návrh takového systému sice složitější, ale zato účinnější. Takto je možno brát buď z dnešních možností trhu, nebo si nechat komponenty vyrobit dle přání dodavatelských firem. Samozřejmě za nemalou provizi. Podstatné ale je fakt, že už dnes lze takovýto akumulční systém z dostupných komponentů postavit, což odpovídá samo o sobě.

V poslední části jsem se zabýval tím, jak by mohl být vodíkový akumulční systém pro fotovoltaickou elektrárnu dotován a kdy by byl pro obvyklého uživatele výhodný. Na podobné téma je mnoho článků a existuje mnoho variant jak vodík ekonomicky posuzovat. K vypracování detailního přístupu je však zapotřebí mnoho času a podkladů ke zpracování. Faktem ale je, že i takováto problematika má svoje řešení.

Na samý závěr lze říci, že lze jen čekat, kam se vodíkové technologie časem posunou. Již dnes je v průmyslu neocenitelným prvkem a vodíkové technologie nikdy ze světa nezmizí. Je dost možné, že za několik desetiletí bude vodík hlavní pákou ve světě. Je však také možné, že se objeví jiné technologie, které vodík z oblasti energetiky a dopravy definitivně odstaví a přestane být tím palivem budoucnosti a energetickým nosičem, jak se nazývá dnes.

Literatura

- [1] Dlouhý P., Janík L. : *Vodíkové hospodářství*, [online], [cit. 25.1.2007], Dostupné z WWW <<http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/clanky/407-vodikove-hospodarstvi>>
- [2] Tuček V., Dvořáková L., Hanzal, J.: *Vodík, Česká asociace technických plynů*, Praha, 2004.
- [3] Air products, *Co možná nevíte...*, [online], Dostupné z WWW <<http://www.airproducts.cz/hydrogen/vodik/vodik.htm>>
- [4] Nieslaník T. : *Vliv slunečních elektráren na elektrizační soustavu*, Diplomová práce, Ostrava, 2012
- [5] Skudřík F. : *Akumulace obnovitelné energie do vodíku*, Diplomová práce, Ostrava, 2011
- [6] Kabeš K. *Vodíkové hospodářství – nový základ energetické politiky EU*, odborné časopisy [online]. [cit. 12.12.2013]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26190>
- [7] Steinberger-Wilckens R., Trümper S.C.: *European Hydrogen Infrastructure Atlas and Industrial Excess Hydrogen Analysis*, [online], Dostupné z <http://www.roads2hy.com/r2h_Downloads/Roads2HyCom%20R2H2005PU%20-%20European%20H2%20Infrastructure%20Atlas%20%28Part%20I%29%20-%20Existing%20H2%20Demonstration%20Sites.pdf>
- [8] Hauch A., Jensen S. H., Ebbesen S. D., Mogensen M., *Durability of Solid Oxide Electrolysis Cells for Hydrogen Production*, [online], Dostupné z <http://www.risoe.dk/risepubl/reports/ris-r-1608_327-338.pdf>
- [9] Air products, *Vodík jako zdroj energie*, [online], Dostupné z WWW <<http://www.airproducts.cz/hydrogen/vodik/zdrojEnergie.htm>>
- [10] Hnát J. : *Přehled vývoje trhu vodíkových aplikací za rok 2012*, [online], [cit. 15.12.2013], Dostupné z WWW <<http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/novinky/547-prehled-vyvoje-trhu-vodikovych-aplikaci-za-rok-2012>>
- [11] Hnát J. : *Na trhu je demonstrační vysokoteplotní palivový článek*, [online], [cit. 15.12.2013], Dostupné z WWW <<http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/novinky/545-na-trhu-je-demonstracni-vysokoteplotni-palivovy-clanek>>

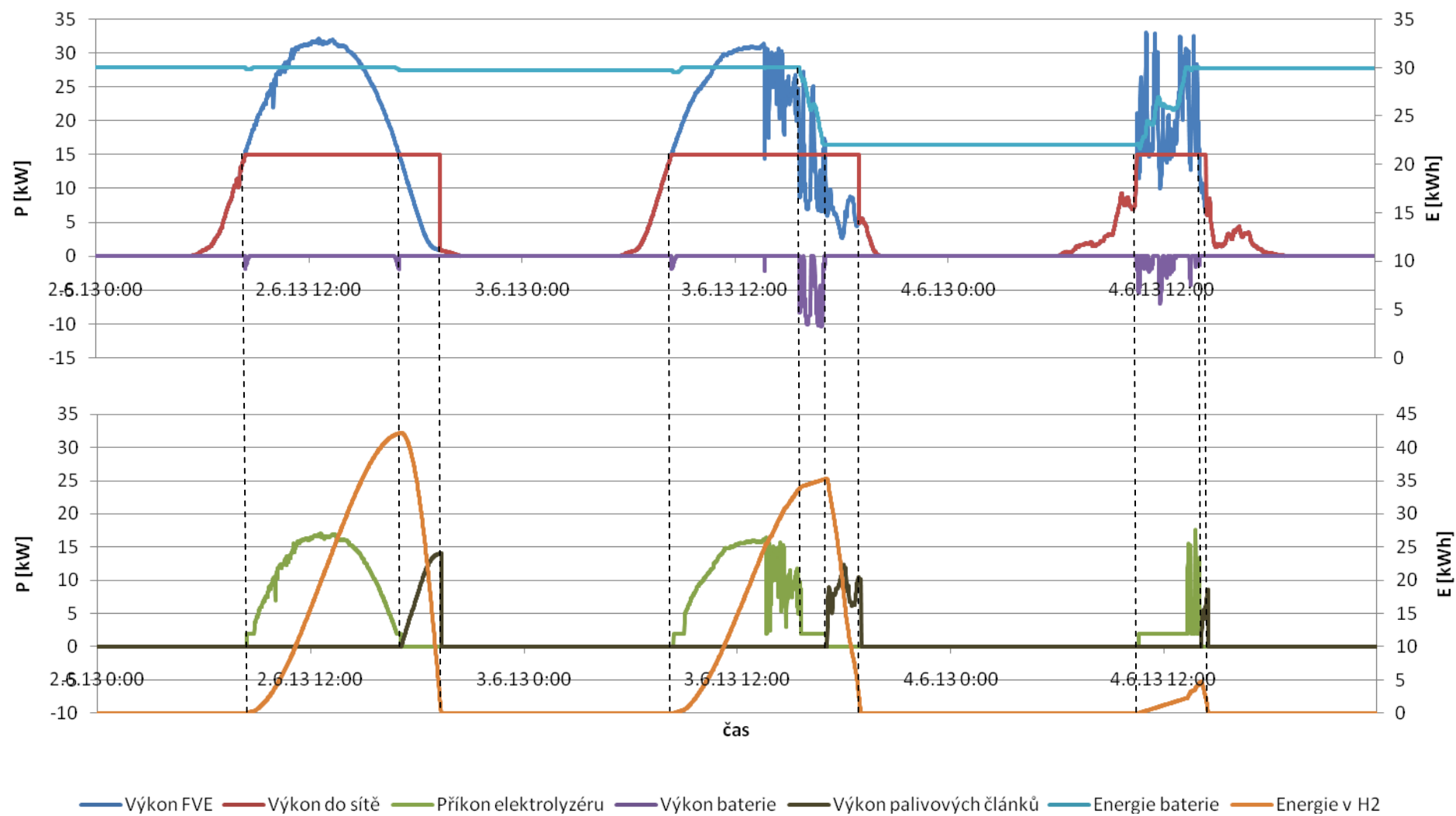
- [12] Carmo M., Fritz L. D., Mergel J., Stolten D., *A comprehensive review on PEM water electrolysis*, [online], [cit 10.12.2013], Dostupné z WWW <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913002607>>
- [13] *Skladování vodíku*; [online]; dostupné z WWW <<http://www.h2shop.cz/index.php?p=article&id=17>>
- [14] Janků J. ; *Do vodíku se schová všechno*, str. 34-35; [online]; dostupné z WWW <http://www1.siemens.cz/visions/public/files/visions_podzim_2012.pdf>
- [15] Horčík J. ; *V Německu spuštěna hybridní vodíková elektrárna*; [online]; Dostupné z WWW <<http://www.ekobydleni.eu/vetrna-energie/v-nemecku-spustena-hybridni-vodikova-elektrarna>>
- [16] Hladík M.; *Vodíkové hospodářství: efektivita investic a jejich hodnocení*; časopis Energetika; str. 489-501
- [17] Janík L. ; *Jak se vyrábí palivo budoucnosti. Vodík pro auta i elektroniku*; [online]; Dostupné z WWW <http://technet.idnes.cz/jak-se-vyrabi-palivo-budoucnosti-vodik-pro-auta-i-elektroniku-p6d-tec-technika.aspx?c=A080127_234744_tec-technika_vse>
- [18] *Průměrné měsíční doby slunečního svitu ve vybraných lokalitách ČR*; [online]; dostupné z WWW <<http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/99-prumerne-mesicni-doby-slunceniho-svitu-ve-vybranych-lokalitach-cr>>
- [19] *Slunce v Londýně*; [online]; dostupné z WWW <<http://www.jaknapsat.cz/slunce-v-londyne/>>
- [20] *Sluneční svit v Č.R.*; [online]; dostupné z WWW <<http://permon-bu.webgarden.cz/rubriky/solarni-systemy/sluncni-svit-v-c-r>>

Přílohy

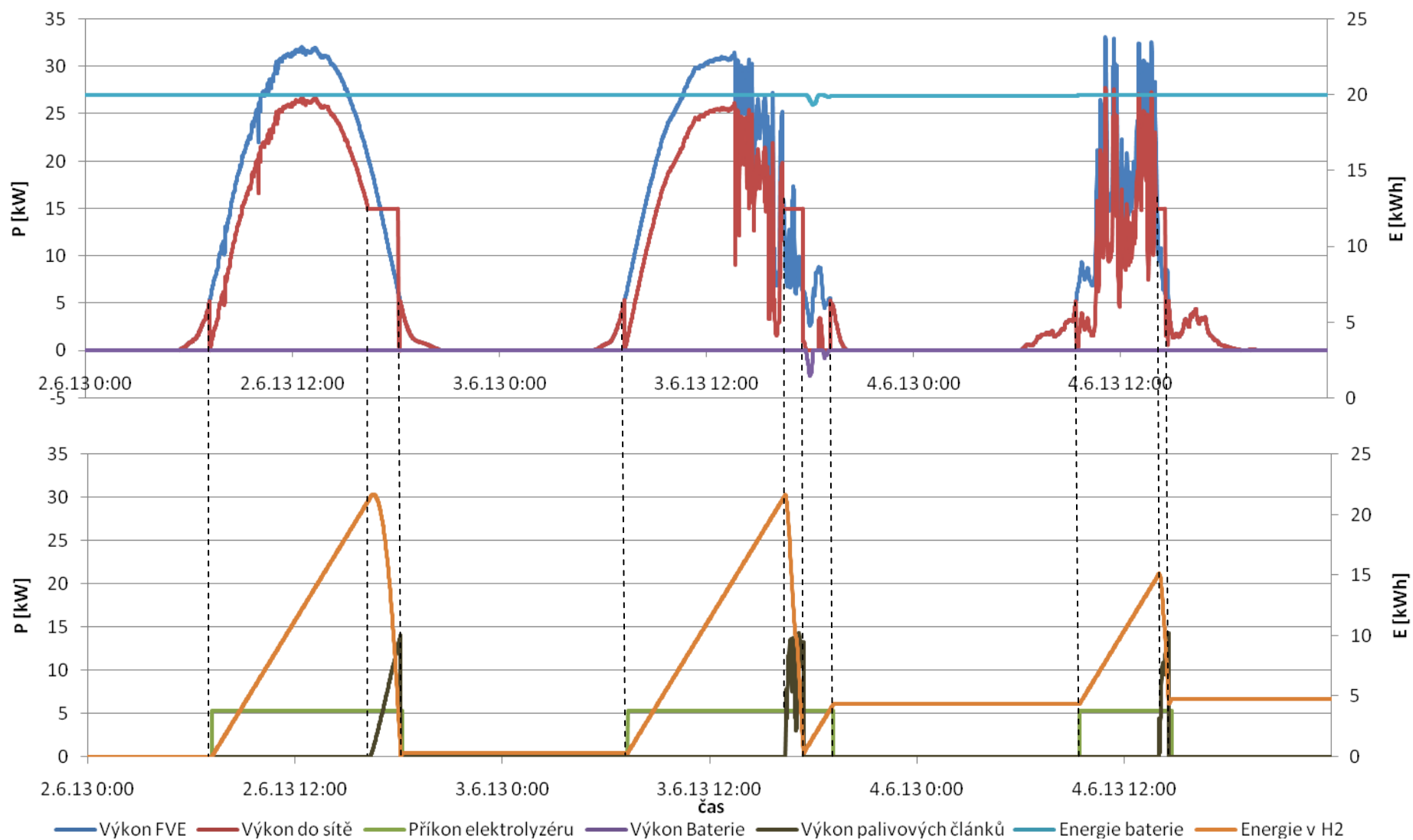
Seznam příloh

Příloha A - Průběh systému 1 během tří dnů	60
Příloha B - Průběh systému 2 během tří dnů	61
Příloha C - Výstavba Systému 1 v roce 2010 (Bonus za kWh)	62
Příloha D - Výstavba Systému 1 v roce 2010 (Bonus za kWh)	63
Příloha E - Výstavba Systému 1 v roce 2015 (Bonus za kWh)	64
Příloha F - Výstavba Systému 1 v roce 2015 (Bonus za kWh)	65
Příloha G - Výstavba Systému 1 v roce 2010 (Bonus za kWh z Palivových článků)	66
Příloha H - Výstavba Systému 1 v roce 2010 (Bonus za kWh z Palivových článků)	67
Příloha CH - Výstavba Systému 1 v roce 2015 (Bonus za kWh z Palivových článků)	68
Příloha I - Výstavba Systému 1 v roce 2015 (Bonus za kWh z Palivových článků)	69

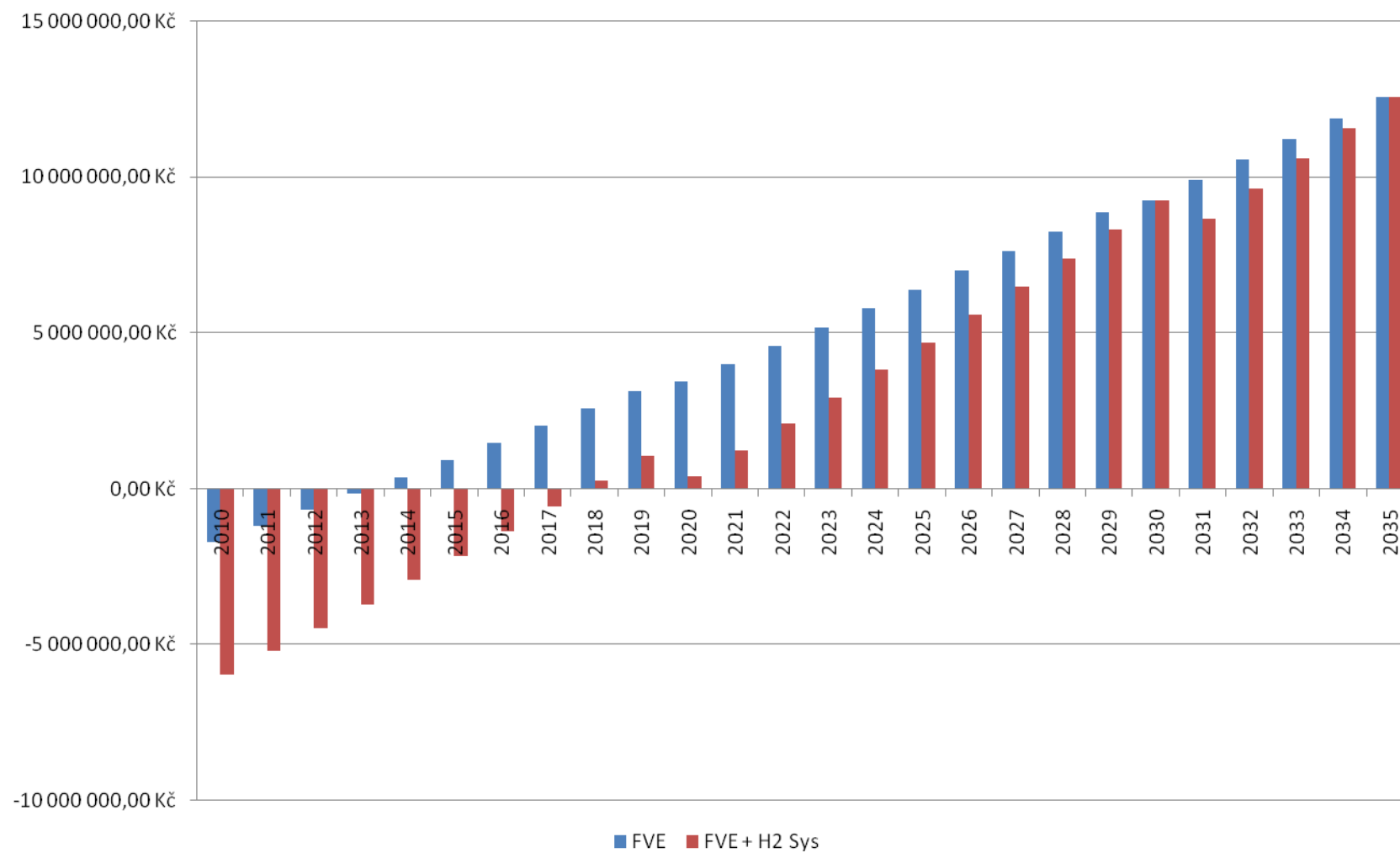
Příloha A - Průběh systému 1 během tří dnů



Příloha B - Průběh systému 2 během tří dnů



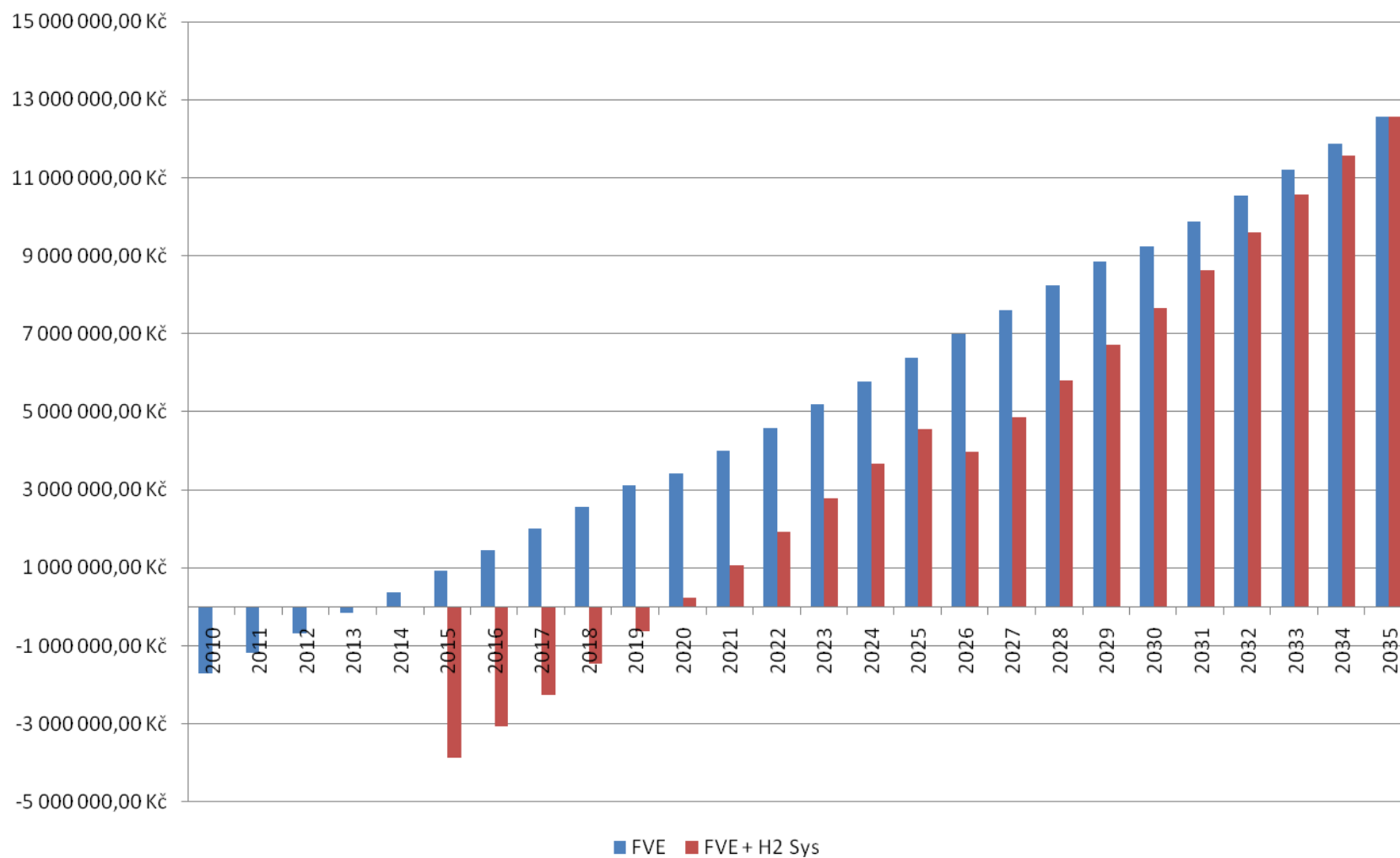
Příloha C - Výstavba Systému 1 v roce 2010 (Bonus za kWh)



Příloha D - Výstavba Systému 1 v roce 2010 (Bonus za kWh)

Všechno postavené v roce 2010							
	Cena kWh FV	Vyprodukováná energie	Provozní náklady FVE	Obyčejná FV 2010	Provozní náklady Systému 1	Cena kWh FVH2	Systém 1 zvýšení bonusu
2010	12,40 Kč	41 245,00	0,00 Kč	-1 700 000,00 Kč	0,00 Kč	18,050 Kč	-5 957 000,00 Kč
2011	12,65 Kč	40 915,04	0,00 Kč	-1 188 562,00 Kč	0,00 Kč	18,411 Kč	-5 212 527,75 Kč
2012	12,90 Kč	40 587,72	0,00 Kč	-670 986,74 Kč	0,00 Kč	18,779 Kč	-4 459 240,95 Kč
2013	13,16 Kč	40 263,02	0,00 Kč	-147 283,40 Kč	0,00 Kč	19,155 Kč	-3 697 035,23 Kč
2014	13,42 Kč	39 940,91	0,00 Kč	382 618,18 Kč	0,00 Kč	19,538 Kč	-2 925 804,99 Kč
2015	13,69 Kč	39 621,39	0,00 Kč	918 793,80 Kč	0,00 Kč	19,929 Kč	-2 145 443,39 Kč
2016	13,97 Kč	39 304,42	0,00 Kč	1 461 317,73 Kč	0,00 Kč	20,327 Kč	-1 355 842,32 Kč
2017	14,25 Kč	38 989,98	0,00 Kč	2 010 265,14 Kč	0,00 Kč	20,734 Kč	-556 892,37 Kč
2018	14,53 Kč	38 678,06	0,00 Kč	2 565 712,10 Kč	0,00 Kč	21,148 Kč	251 517,16 Kč
2019	14,82 Kč	38 368,64	0,00 Kč	3 127 735,54 Kč	0,00 Kč	21,571 Kč	1 069 498,24 Kč
2020	15,12 Kč	38 061,69	262 877,11 Kč	3 433 536,24 Kč	1 500 000,00 Kč	22,003 Kč	397 164,24 Kč
2021	15,42 Kč	37 757,19	0,00 Kč	4 008 947,19 Kč	0,00 Kč	22,443 Kč	1 234 629,80 Kč
2022	15,73 Kč	37 455,14	0,00 Kč	4 591 171,00 Kč	0,00 Kč	22,892 Kč	2 082 010,95 Kč
2023	16,04 Kč	37 155,50	0,00 Kč	5 180 288,35 Kč	0,00 Kč	23,350 Kč	2 939 425,09 Kč
2024	16,36 Kč	36 858,25	0,00 Kč	5 776 380,84 Kč	0,00 Kč	23,817 Kč	3 806 991,03 Kč
2025	16,69 Kč	36 563,39	0,00 Kč	6 379 531,07 Kč	0,00 Kč	24,293 Kč	4 684 828,94 Kč
2026	17,03 Kč	36 270,88	0,00 Kč	6 989 822,59 Kč	0,00 Kč	24,779 Kč	5 573 060,46 Kč
2027	17,37 Kč	35 980,71	0,00 Kč	7 607 339,97 Kč	0,00 Kč	25,274 Kč	6 471 808,61 Kč
2028	17,71 Kč	35 692,87	0,00 Kč	8 232 168,76 Kč	0,00 Kč	25,780 Kč	7 381 197,94 Kč
2029	18,07 Kč	35 407,32	0,00 Kč	8 864 395,51 Kč	0,00 Kč	26,295 Kč	8 301 354,46 Kč
2030	18,43 Kč	35 124,06	262 877,11 Kč	9 241 230,73 Kč	0,00 Kč	26,821 Kč	9 232 405,63 Kč
2031	18,80 Kč	34 843,07	0,00 Kč	9 888 517,25 Kč	1 500 000,00 Kč	27,358 Kč	8 674 480,44 Kč
2032	19,17 Kč	34 564,33	0,00 Kč	10 543 467,63 Kč	0,00 Kč	27,905 Kč	9 627 709,42 Kč
2033	19,56 Kč	34 287,81	0,00 Kč	11 206 172,63 Kč	0,00 Kč	28,463 Kč	10 592 224,62 Kč
2034	19,95 Kč	34 013,51	0,00 Kč	11 876 724,06 Kč	0,00 Kč	29,032 Kč	11 568 159,70 Kč
2035	20,35 Kč	33 741,40	0,00 Kč	12 555 214,82 Kč	0,00 Kč	29,613 Kč	12 555 649,84 Kč

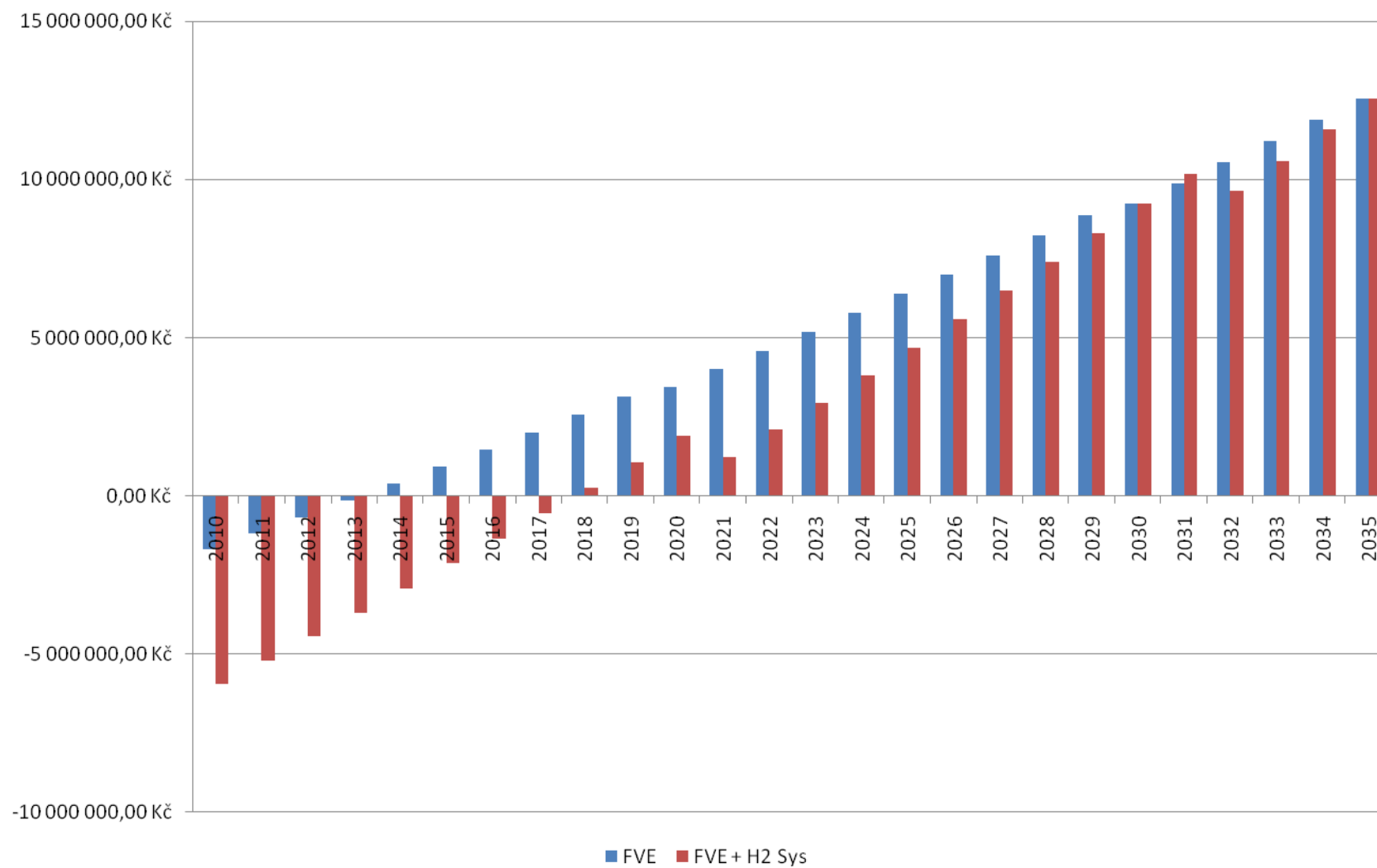
Příloha E - Výstavba Systému 1 v roce 2015 (Bonus za kWh)



Příloha F - Výstavba Systému 1 v roce 2015 (Bonus za kWh)

Systém postavený v roce 2015							
	Cena kWh FV	Vyprodukováná energie	Provozní náklady FVE	Obyčejná FV 2010	Provozní náklady Systému 1	Cena kWh FVH2	Systém 1 zvýšení bonusu
2010	12,40 Kč	41 245,00	0,00 Kč	-1 700 000,00 Kč			
2011	12,65 Kč	40 915,04	0,00 Kč	-1 188 562,00 Kč			
2012	12,90 Kč	40 587,72	0,00 Kč	-670 986,74 Kč			
2013	13,16 Kč	40 263,02	0,00 Kč	-147 283,40 Kč			
2014	13,42 Kč	39 940,91	0,00 Kč	382 618,18 Kč			
2015	13,69 Kč	39 621,39	0,00 Kč	918 793,80 Kč	0,00 Kč	20,186 Kč	-3 874 381,82 Kč
2016	13,97 Kč	39 304,42	0,00 Kč	1 461 317,73 Kč	0,00 Kč	20,590 Kč	-3 074 584,52 Kč
2017	14,25 Kč	38 989,98	0,00 Kč	2 010 265,14 Kč	0,00 Kč	21,002 Kč	-2 265 317,62 Kč
2018	14,53 Kč	38 678,06	0,00 Kč	2 565 712,10 Kč	0,00 Kč	21,422 Kč	-1 446 469,00 Kč
2019	14,82 Kč	38 368,64	0,00 Kč	3 127 735,54 Kč	0,00 Kč	21,850 Kč	-617 925,21 Kč
2020	15,12 Kč	38 061,69	262 877,11 Kč	3 433 536,24 Kč	0,00 Kč	22,287 Kč	220 428,55 Kč
2021	15,42 Kč	37 757,19	0,00 Kč	4 008 947,19 Kč	0,00 Kč	22,733 Kč	1 068 708,42 Kč
2022	15,73 Kč	37 455,14	0,00 Kč	4 591 171,00 Kč	0,00 Kč	23,187 Kč	1 927 031,92 Kč
2023	16,04 Kč	37 155,50	0,00 Kč	5 180 288,35 Kč	0,00 Kč	23,651 Kč	2 795 517,97 Kč
2024	16,36 Kč	36 858,25	0,00 Kč	5 776 380,84 Kč	0,00 Kč	24,124 Kč	3 674 286,90 Kč
2025	16,69 Kč	36 563,39	0,00 Kč	6 379 531,07 Kč	1 500 000,00 Kč	24,607 Kč	4 563 460,46 Kč
2026	17,03 Kč	36 270,88	0,00 Kč	6 989 822,59 Kč	0,00 Kč	25,099 Kč	3 963 161,83 Kč
2027	17,37 Kč	35 980,71	0,00 Kč	7 607 339,97 Kč	0,00 Kč	25,601 Kč	4 873 515,64 Kč
2028	17,71 Kč	35 692,87	0,00 Kč	8 232 168,76 Kč	0,00 Kč	26,113 Kč	5 794 648,04 Kč
2029	18,07 Kč	35 407,32	0,00 Kč	8 864 395,51 Kč	0,00 Kč	26,635 Kč	6 726 686,67 Kč
2030	18,43 Kč	35 124,06	262 877,11 Kč	9 241 230,73 Kč	0,00 Kč	27,168 Kč	7 669 760,63 Kč
2031	18,80 Kč	34 843,07	0,00 Kč	9 888 517,25 Kč	0,00 Kč	27,711 Kč	8 624 000,58 Kč
2032	19,17 Kč	34 564,33	0,00 Kč	10 543 467,63 Kč	0,00 Kč	28,265 Kč	9 589 538,74 Kč
2033	19,56 Kč	34 287,81	0,00 Kč	11 206 172,63 Kč	0,00 Kč	28,831 Kč	10 566 508,86 Kč
2034	19,95 Kč	34 013,51	0,00 Kč	11 876 724,06 Kč	0,00 Kč	29,407 Kč	11 555 046,32 Kč
2035	20,35 Kč	33 741,40	0,00 Kč	12 555 214,82 Kč	0,00 Kč	29,995 Kč	12 555 288,05 Kč

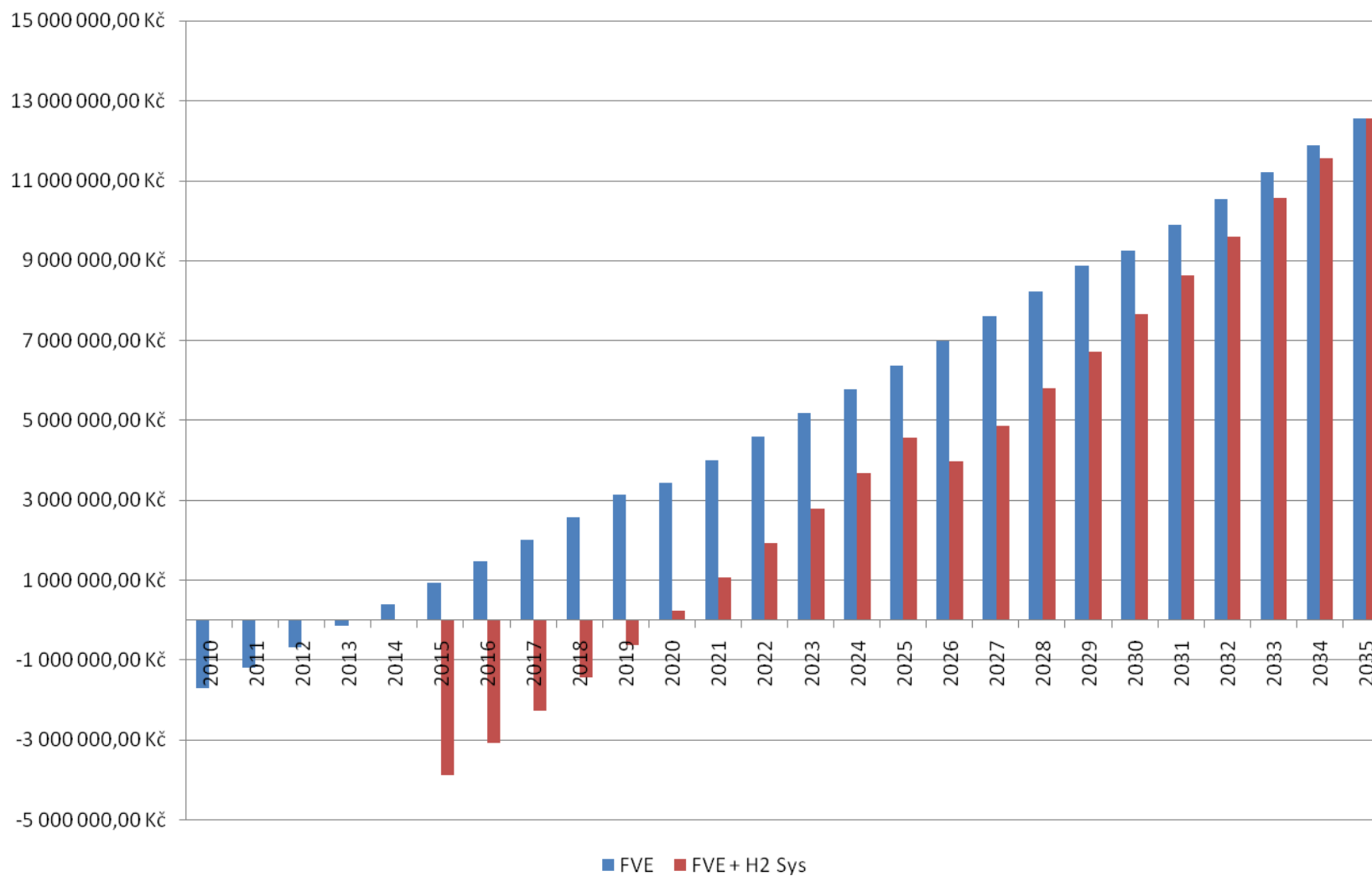
Příloha G - Výstavba Systému 1 v roce 2010 (Bonus za kWh z Palivových článků)



Příloha H - Výstavba Systému 1 v roce 2010 (Bonus za kWh z Palivových článků)

Všechno postavené v roce 2010								
	Cena kWh FV	Vyprodukováná energie	Provozní náklady FVE	Obyčejná FV 2010	Provozní náklady Sys. 1	Vyrobená energie v pal článkách	Cena kWh H2	Bonus na pal články Sys. 1
2010	12,40 Kč	41 245,00	0,00 Kč	-1 700 000,00 Kč	0,00 Kč	2 800,30	83,185 Kč	-5 957 000,00 Kč
2011	12,65 Kč	40 915,04	0,00 Kč	-1 188 562,00 Kč	0,00 Kč	2 777,90	84,849 Kč	-5 212 619,04 Kč
2012	12,90 Kč	40 587,72	0,00 Kč	-670 986,74 Kč	0,00 Kč	2 755,68	86,546 Kč	-4 459 342,58 Kč
2013	13,16 Kč	40 263,02	0,00 Kč	-147 283,40 Kč	0,00 Kč	2 733,63	88,277 Kč	-3 697 147,05 Kč
2014	13,42 Kč	39 940,91	0,00 Kč	382 618,18 Kč	0,00 Kč	2 711,76	90,042 Kč	-2 925 929,94 Kč
2015	13,69 Kč	39 621,39	0,00 Kč	918 793,80 Kč	0,00 Kč	2 690,07	91,843 Kč	-2 145 590,50 Kč
2016	13,97 Kč	39 304,42	0,00 Kč	1 461 317,73 Kč	0,00 Kč	2 668,55	93,680 Kč	-1 355 990,86 Kč
2017	14,25 Kč	38 989,98	0,00 Kč	2 010 265,14 Kč	0,00 Kč	2 647,20	95,553 Kč	-557 036,81 Kč
2018	14,53 Kč	38 678,06	0,00 Kč	2 565 712,10 Kč	0,00 Kč	2 626,02	97,464 Kč	251 363,45 Kč
2019	14,82 Kč	38 368,64	0,00 Kč	3 127 735,54 Kč	0,00 Kč	2 605,02	99,414 Kč	1 069 338,03 Kč
2020	15,12 Kč	38 061,69	262 877,11 Kč	3 433 536,24 Kč	1 500 000,00 Kč	2 584,18	101,402 Kč	1 896 974,46 Kč
2021	15,42 Kč	37 757,19	0,00 Kč	4 008 947,19 Kč	0,00 Kč	2 563,50	103,430 Kč	1 234 432,19 Kč
2022	15,73 Kč	37 455,14	0,00 Kč	4 591 171,00 Kč	0,00 Kč	2 542,99	105,499 Kč	2 081 791,15 Kč
2023	16,04 Kč	37 155,50	0,00 Kč	5 180 288,35 Kč	0,00 Kč	2 522,65	107,609 Kč	2 939 205,10 Kč
2024	16,36 Kč	36 858,25	0,00 Kč	5 776 380,84 Kč	0,00 Kč	2 502,47	109,761 Kč	3 806 749,72 Kč
2025	16,69 Kč	36 563,39	0,00 Kč	6 379 531,07 Kč	0,00 Kč	2 482,45	111,956 Kč	4 684 571,35 Kč
2026	17,03 Kč	36 270,88	0,00 Kč	6 989 822,59 Kč	0,00 Kč	2 462,59	114,195 Kč	5 572 776,12 Kč
2027	17,37 Kč	35 980,71	0,00 Kč	7 607 339,97 Kč	0,00 Kč	2 442,89	116,479 Kč	6 471 503,71 Kč
2028	17,71 Kč	35 692,87	0,00 Kč	8 232 168,76 Kč	0,00 Kč	2 423,35	118,809 Kč	7 380 890,30 Kč
2029	18,07 Kč	35 407,32	0,00 Kč	8 864 395,51 Kč	0,00 Kč	2 403,96	121,185 Kč	8 301 033,00 Kč
2030	18,43 Kč	35 124,06	262 877,11 Kč	9 241 230,73 Kč	0,00 Kč	2 384,73	123,609 Kč	9 232 060,59 Kč
2031	18,80 Kč	34 843,07	0,00 Kč	9 888 517,25 Kč	1 500 000,00 Kč	2 365,65	126,081 Kč	10 174 134,92 Kč
2032	19,17 Kč	34 564,33	0,00 Kč	10 543 467,63 Kč	0,00 Kč	2 346,72	128,602 Kč	9 627 342,95 Kč
2033	19,56 Kč	34 287,81	0,00 Kč	11 206 172,63 Kč	0,00 Kč	2 327,95	131,174 Kč	10 591 838,40 Kč
2034	19,95 Kč	34 013,51	0,00 Kč	11 876 724,06 Kč	0,00 Kč	2 309,33	133,798 Kč	11 567 772,51 Kč
2035	20,35 Kč	33 741,40	0,00 Kč	12 555 214,82 Kč	0,00 Kč	2 290,85	136,474 Kč	12 555 257,38 Kč

Příloha CH - Výstavba Systému 1 v roce 2015 (Bonus za kWh z Palivových článků)



Příloha I - Výstavba Systému 1 v roce 2015 (Bonus za kWh z Palivových článků)

Všechno postavené v roce 2015								
	Cena kWh FVE	Vyprodukováná energie	Provozní náklady FVE	Obyčejná FVE 2010	Provozní náklady Systému 1	Vyrobená energie v pal článkách	Cena kWh H2	Bonus na pal článek Sys. 1
2010	12,40 Kč	41 245,00	0,00 Kč	-1 700 000,00 Kč				
2011	12,65 Kč	40 915,04	0,00 Kč	-1 188 562,00 Kč	0,00 Kč			
2012	12,90 Kč	40 587,72	0,00 Kč	-670 986,74 Kč	0,00 Kč			
2013	13,16 Kč	40 263,02	0,00 Kč	-147 283,40 Kč	0,00 Kč			
2014	13,42 Kč	39 940,91	0,00 Kč	382 618,18 Kč	0,00 Kč			
2015	13,69 Kč	39 621,39	0,00 Kč	918 793,80 Kč	0,00 Kč	2 690,07	95,637 Kč	-3 874 381,82 Kč
2016	13,97 Kč	39 304,42	0,00 Kč	1 461 317,73 Kč	0,00 Kč	2 668,55	97,550 Kč	-3 074 575,96 Kč
2017	14,25 Kč	38 989,98	0,00 Kč	2 010 265,14 Kč	0,00 Kč	2 647,20	99,501 Kč	-2 265 294,83 Kč
2018	14,53 Kč	38 678,06	0,00 Kč	2 565 712,10 Kč	0,00 Kč	2 626,02	101,491 Kč	-1 446 445,23 Kč
2019	14,82 Kč	38 368,64	0,00 Kč	3 127 735,54 Kč	0,00 Kč	2 605,02	103,521 Kč	-617 897,61 Kč
2020	15,12 Kč	38 061,69	262 877,11 Kč	3 433 536,24 Kč	0,00 Kč	2 584,18	105,591 Kč	220 437,09 Kč
2021	15,42 Kč	37 757,19	0,00 Kč	4 008 947,19 Kč	0,00 Kč	2 563,50	107,703 Kč	1 068 719,76 Kč
2022	15,73 Kč	37 455,14	0,00 Kč	4 591 171,00 Kč	0,00 Kč	2 542,99	109,857 Kč	1 927 031,79 Kč
2023	16,04 Kč	37 155,50	0,00 Kč	5 180 288,35 Kč	0,00 Kč	2 522,65	112,054 Kč	2 795 528,50 Kč
2024	16,36 Kč	36 858,25	0,00 Kč	5 776 380,84 Kč	0,00 Kč	2 502,47	114,295 Kč	3 674 287,10 Kč
2025	16,69 Kč	36 563,39	0,00 Kč	6 379 531,07 Kč	1 500 000,00 Kč	2 482,45	116,581 Kč	4 563 455,50 Kč
2026	17,03 Kč	36 270,88	0,00 Kč	6 989 822,59 Kč	0,00 Kč	2 462,59	118,913 Kč	3 963 141,39 Kč
2027	17,37 Kč	35 980,71	0,00 Kč	7 607 339,97 Kč	0,00 Kč	2 442,89	121,291 Kč	4 873 486,02 Kč
2028	17,71 Kč	35 692,87	0,00 Kč	8 232 168,76 Kč	0,00 Kč	2 423,35	123,717 Kč	5 794 627,21 Kč
2029	18,07 Kč	35 407,32	0,00 Kč	8 864 395,51 Kč	0,00 Kč	2 403,96	126,191 Kč	6 726 663,69 Kč
2030	18,43 Kč	35 124,06	262 877,11 Kč	9 241 230,73 Kč	0,00 Kč	2 384,73	128,715 Kč	7 669 725,87 Kč
2031	18,80 Kč	34 843,07	0,00 Kč	9 888 517,25 Kč	0,00 Kč	2 365,65	131,289 Kč	8 623 977,30 Kč
2032	19,17 Kč	34 564,33	0,00 Kč	10 543 467,63 Kč	0,00 Kč	2 346,72	133,915 Kč	9 589 506,58 Kč
2033	19,56 Kč	34 287,81	0,00 Kč	11 206 172,63 Kč	0,00 Kč	2 327,95	136,593 Kč	10 566 469,15 Kč
2034	19,95 Kč	34 013,51	0,00 Kč	11 876 724,06 Kč	0,00 Kč	2 309,33	139,325 Kč	11 555 017,99 Kč
2035	20,35 Kč	33 741,40	0,00 Kč	12 555 214,82 Kč	0,00 Kč	2 290,85	142,112 Kč	12 555 266,99 Kč